

Carlos Andrés Trasviña Moreno

Redes autónomas e inteligentes para la monitorización de variables ambientales

Departamento
Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Director/es
CASAS NEBRA, ROBERTO JOSÉ
BLASCO MARÍN, RUBÉN

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Reconocimiento – NoComercial – SinObraDerivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.

© Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

**REDES AUTÓNOMAS E INTELIGENTES PARA LA
MONITORIZACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES**

Autor

Carlos Andrés Trasviña Moreno

Director/es

**CASAS NEBRA, ROBERTO JOSÉ
BLASCO MARÍN, RUBÉN**

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

2019



Departamento de
Ingeniería Electrónica
y Comunicaciones
Universidad Zaragoza



Universidad Zaragoza

Redes autónomas e inteligentes para la monitorización de variables ambientales

Tesis Doctoral

Presentada por:

Carlos Andrés Trasviña Moreno

Directores:

Dr. Roberto Casas Nebra

Dr. Rubén Blasco Marín

Zaragoza, Mayo 2019

Agradecimientos

Esta Tesis Doctoral se llevó a cabo gracias a la financiación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) que me otorgó una beca para estudios de posgrados en el extranjero.

Antes que nada quisiera agradecer a mi familia por apoyarme en esta aventura... a mi papá por enseñarme que darse por vencido no es una opción y que siempre hay que buscar más de la vida, quien diría que terminaría siendo doctor, verdad?... a mi mamá por todo el amor que siempre me ha dado y por entenderme aunque no siempre diga cosas con sentido, ah! Y no se me olvidan los guantes que me tejiste para poder escribir la tesis más agusto, si sirvieron amá... a mi hermana por nunca dejarme sentir cabizbajo en la vida y especialmente en el doctorado, además de darme un par de sobrinas hermosas, ahora si chata, ya somos doctores los dos... y mi hermano que siempre me ha entendido y ha querido lo mejor para mí, no importa el destino al que vayamos, bro sé que nunca dudaste de mi... en fin, los amo y no podría pedir mejor familia.

Agradezco a mis directores Roberto y Rubén por guiarme en este arduo proceso, transmitir su conocimiento y ayudarme en lo laboral y personal, no siempre nos poníamos de acuerdo pero siempre nos reíamos al final... a Ángel quien también me ayudo a crecer como profesional, nunca fuiste mi maestro pero me enseñaste mucho, desde la técnica de la cobra para desoldar hasta los más mínimos detalles de la cerveza, ay no mas!... Teresa y Álvaro por los buenos ratos que pasamos en el labo y fuera de él... a todo el grupo HOWLab que para mí, más que compañeros los considero amigos, gracias por haberme hecho sentir uno más de ustedes.

A Romo, Carlos, Chuck, Edu, Farah Diego, Ester y los de más que estoy seguro que me están faltando... gracias por todas las risas, los buenos recuerdos y más que nada, por ser mis amigos aunque no siempre estemos en el mismo lugar.

Por último, a mi mejor amiga y compañera de vida, mi esposa Gaby... sin ti no hubiera conseguido este logro, en los momentos más difíciles siempre supiste como hacerme reír y olvidarme todo. Iniciamos este camino y ahora lo vemos culminar, solo para ver que nuevas aventuras vamos a empezar... juntos siempre en la locura.

Contenido

Capítulo 1: Introducción.....	4
1.1 Motivación	4
1.2 Marco de desarrollo de la tesis	6
1.3 Objetivos	7
1.4 Metodología	8
1.4.1 Sistema autónomo de monitorización inalámbrica.....	8
1.4.2 Sistema de monitorización ambiental no supervisado.....	9
1.4.3 Diseño de WSN	10
1.5 Estructura de la tesis	11
Capítulo 2: Estado del Arte.....	13
2.1 WSN en la historia y en el mundo.....	13
2.2 Redes WSN IoT.....	15
2.3 Comunicaciones inalámbricas en WSN	16
2.4 Arquitectura general de un nodo	18
Capítulo 3: Sistema autónomo para monitorización de viviendas	22
3.1 Introducción.....	22
3.2 Estado del arte y aplicaciones específicas.....	25
3.2.1 Comunicaciones inalámbricas en WSN	25
3.2.2 Energy harvesting para WSN.....	27
3.3 Propuesta de sistema	30
3.4 Arquitectura central del nodo	32
3.4.1 Descripción de la arquitectura	32
3.4.2 Caracterización energética del nodo.	33
3.5 Bloque de <i>energy harvesting</i>	37

3.5.1	Arquitectura del bloque de <i>energy harvesting</i>	37
3.5.2	Caracterización del generador termoelectrico	39
3.5.3	Evaluación del bloque de <i>energy harvesting</i>	42
3.6	Validación del nodo sensor	47
3.6.1	Pruebas en el entorno doméstico	47
3.6.2	Sostenibilidad del nodo sensor	50
3.7	Discusión	51
3.8	Conclusiones	54
Capítulo 4: Sistema de monitorización no supervisado para zonas ecológicas protegidas.....		55
4.1	Monitorización en ambientes marinos	55
4.2	Estado del arte y aplicaciones específicas.....	57
4.2.1	Sistemas de monitorización marina.....	57
4.2.2	LoRa WSN para monitorización ambiental	61
4.3	Propuesta de sistema	62
4.4	Análisis de la modulación LoRa.....	66
4.4.1	Ensayos de frecuencia de operación	67
4.4.2	Ensayos de consumo energético.....	72
4.4.3	Contraste tecnológico de comunicaciones inalámbricas.....	75
4.4.4	Pruebas de rango máximo	77
4.5	Arquitectura del Sistema de SIMMA	79
4.5.1	Protocolo LoRaNET	80
4.5.2	Nodo sensor	82
4.5.3	Nodo de control	86
4.5.4	Diseño de la boya.....	88
4.5.5	Diseño del UAV	90
4.5.6	Interfaz gráfica de usuario	91
4.6	Pruebas de validación del sistema	92
4.6.1	Pruebas de sistema iniciales.....	93
4.6.2	Prueba de campo	95
4.6.3	Análisis posterior a pruebas	97
4.7	Re-diseño del prototipo.....	98
4.7.1	Pruebas de re-calibración de los sensores	101
4.7.2	Pruebas de validación del prototipo v2.....	103
4.8	Discusión	105
4.9	Conclusiones	107

Capítulo 5: Métricas para el análisis, selección y diseño de una WSN	108
5.1 Introducción.....	108
5.2 Métricas en la literatura	110
5.3 Clasificación de las métricas para el diseño de WSN.....	112
5.3.1 Métricas de <i>hardware</i>	112
5.3.2 Métricas de red	113
5.3.3 Métricas de aplicación.....	114
5.4 Metodología	116
5.4.1 Fase de diseño inicial.....	117
5.4.2 Fase de diseño básica.....	118
5.4.3 Fase de diseño avanzada	119
5.4.4 Fase de diseño detallada.....	121
5.5 Implementación de la metodología	122
5.5.1 Entorno y escenarios de pruebas.....	122
5.5.2 Aplicación de las métricas a los escenarios.....	124
5.5.3 Proceso de selección y resultados.....	132
5.6 Discusión	137
5.7 Conclusiones	138
Capítulo 6: Conclusiones y líneas de trabajo futuro	140
6.1 Conclusiones	140
6.2 Aportaciones a las WSN autónomas con conectividad IP	141
6.3 Aportaciones a las WSN para preservación ambiental	143
6.4 Aportaciones a las métricas para el diseño de WSN	145
6.5 Líneas de trabajo a futuro	146
Bibliografía.....	149
Anexos	172
Anexo I: Esquemático nodo autónomo	173
Anexo II: Esquemático sistema no supervisado.....	174
Anexo III: Publicaciones.....	180

Capítulo 1: Introducción

En este primer capítulo se presenta la motivación por la cual se buscó desarrollar la presente tesis, definiendo los objetivos, el marco de desarrollo de la misma y la metodología utilizada en cada etapa de la implementación de los sistemas propuestos. Finalmente se muestra la estructura que rige este trabajo, permitiendo al lector tener una perspectiva global de la tesis desarrollada.

1.1 Motivación

Desde el inicio de las primeras civilizaciones, el ser humano siempre ha tenido un fuerte deseo de conocer su entorno, ya sea por cuestión de supervivencia, poder, salud, buscar estar a la vanguardia o, simplemente, el deseo del conocimiento. El entendimiento de nuestro entorno, lo cual comprende desde nuestro cuerpo hasta el espacio que nos rodea, nos permite reaccionar ante distintas situaciones de manera más ágil y eficiente, permitiéndonos evolucionar a través de la historia. Debido a esto, la búsqueda no ha cesado, solo ha cambiado la manera en que se obtiene la información.

La observación y el empirismo en primera persona siempre han sido los métodos utilizados para conocer nuestro entorno; no obstante, algunos fenómenos no son fácilmente captados con tan solo nuestros sentidos. Para poder obtener esta información, se ha recurrido a la tecnología, la cual se ha convertido en una extensión de nosotros mismos y nos permite seguir ahondando en este entendimiento. Hoy en día, uno de los métodos más extendidos para obtener esta información son las Redes de Sensores Inalámbricas o WSN, por sus siglas en inglés (*Wireless Sensor Networks*).

Cada día, dispositivos sensores capturan volúmenes inimaginables de datos, midiendo variables como el ritmo cardiaco de un deportista, los niveles de glucosa de una persona con diabetes, los movimientos tectónicos de una zona sísmica o los niveles de radiación de un reactor nuclear, entre muchas otras posibilidades. Tan solo los dispositivos Fitbit (Fitbit, 2019), un monitor de actividades popular, han capturado 108 billones de horas de datos de ritmo cardiaco desde el 2014 y han contado 45 trillones de pasos desde el 2017 de todos sus usuarios (DMR, 2019). La importancia de estos sistemas ha sido tan grande que, según los estudios de *BCC Research*, en 2021 el mercado global de sensores inalámbricos alcanzará la cantidad de \$7.7 billones de USD (BCC Research, 2016).

Analizando estas cifras, es posible entender el gran impacto que están teniendo los sensores inalámbricos desde una perspectiva de mercado; sin embargo, su verdadera relevancia se debe a los logros generados con la información adquirida. Con los datos obtenidos de diversas redes de sensores, ha sido posible mejorar la calidad de vida y asistencia a personas de la tercera edad o con necesidades especiales (Tuna and Das, 2015; Yu, Weller and Grattan, 2015; Aburukba *et al.*, 2016a), simplificar el rastreo de animales salvajes con mínimas perturbaciones a su hábitat (Xu *et al.*, 2015) o analizar su comportamiento (Bhargava *et al.*, 2017), mejorar procesos en granjas de diversos ámbitos (Edwards-Murphy *et al.*, 2016; Bhargava *et al.*, 2017; Rocher *et al.*, 2018) o prevenir situaciones de desastre en zonas urbanas (Reina *et al.*, 2015; Erdelj, Natalizio and Akyildiz, 2017), entre otros.

La importancia de estos sistemas en áreas de aplicación como las ciudades inteligentes se ve enfatizado por el impacto que tiene en el desarrollo humano. En este caso, el constante crecimiento de la población mundial trae consigo problemas relacionados a sobrepoblación, consumo energético, manejo de recursos y protección ambiental, además de un fuerte incremento en las urbanizaciones (Manville *et al.*, 2014). En países en desarrollo, donde estos temas resultan mucho más críticos (Lambrechts and Sinha, 2016; Nair and Sharma, 2017), es necesario recurrir a tecnologías como las WSN para mejorar la competitividad en estas áreas.

La preservación ambiental es otro campo de aplicación de gran relevancia, ya que el valor de los recursos que se protegen resulta incuantificable para la humanidad y los datos obtenidos de este tipo de estudios resultan útiles para propósitos adicionales (Lovett *et al.*, 2007). Es importante entender que dentro de esta área de estudio se engloban todos los factores bióticos y abióticos existentes en un ambiente dado, por lo que los datos que se requieren para los estudios son muy diversos y, por lo general, de gran volumen. En muchas ocasiones, la monitorización ambiental ha sido cuestionada debido al mal uso o desuso de la información obtenida en los estudios (Lovett *et al.*, 2007; Weston, 2011). Sin embargo, en caso contrario, el correcto uso de tecnologías de monitorización, como las WSN, han brindado soluciones a múltiples problemas de preservación ecológica con una

alteración mínima del ambiente o su biota (Chen, Chuang and Jiang, 2013; Mathur *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2015).

Debido a esto, en la presente tesis doctoral se pretende abordar la temática de redes de sensores inalámbricos, tanto en lo referente a las ciudades inteligentes y entornos domésticos como en la preservación ambiental, proporcionando alternativas tecnológicas a necesidades reales en estos campos.

1.2 Marco de desarrollo de la tesis

La presente tesis se desarrolló dentro del marco de investigación de dos proyectos distintos, correspondientes a la temática de las áreas de aplicación de interés, en los que se participó a través del grupo HOWLab. El primero de ellos es el proyecto Memory Lane (MeLa), el cual plantea investigar entornos inteligentes para el soporte a la autonomía de personas con necesidades especiales. Esta propuesta se dividió en cuatro partes: sentido audiovisual, interpretación semántica, seguimiento de actividades y sensores electrónicos. Debido al gran alcance de este proyecto, MeLa fue desarrollado por dos grupos de investigación distintos de la Universidad de Zaragoza: CVLab, encargados de las actividades de reconocimiento por visión de computador, y HOWLab, responsables de la parte de redes de sensores, comunicaciones inalámbricas y ambientes inteligentes. Este proyecto fue financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

Debido al enfoque de la presente tesis, de las cuatro categorías en las que se divide el proyecto, se participó en el área de sensores electrónicos, en la que se buscó desarrollar dispositivos energéticamente autónomos dentro de un hogar inteligente. Estos habrían de monitorizar variables ambientales y reportar la información captada, sin necesidad de interacción humana, para su posterior análisis. Estos dispositivos se relacionan con la propuesta de MeLa al proveer información acerca del entorno y componentes de una vivienda a los usuarios, permitiendo la gestión de los distintos sistemas a través de otras integraciones dentro del proyecto. El desarrollo realizado para este proyecto se llevó a cabo entre el periodo de 2014 a 2016.

El segundo proyecto de investigación es el programa del Sistema Multipropósito para el Monitoreo del Ambiente o SIMMA. El objetivo general del mismo es la de monitorizar diversas variables ambientales de línea costera en México para la preservación de reservas naturales protegidas, utilizando redes de sensores, fotografía multispectral aérea y vehículos aéreos no tripulados o drones. Este proyecto fue un esfuerzo dividido entre dos grupos, el laboratorio SERVANT, del Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada (CICESE) unidad La Paz (México), encargados de los drones, fotografía aérea e interpretación de los datos ambientales y HOWLab, de la Universidad de

Zaragoza, quienes desarrollaron la red de sensores inalámbricos y el protocolo de comunicaciones, primordialmente.

En este proyecto se participó en la conceptualización del sistema, diseño e implementación de la red de sensores inteligentes capaz de captar variables físicas marítimas y ambientales por periodos extendidos de tiempo, el desarrollo de un protocolo de comunicaciones inalámbrico apto para ambientes marinos y transmisiones a grandes distancias y la realización de un encapsulado adecuado para condiciones marítimas. La realización de este proyecto se llevó a cabo entre el periodo 2016 a 2018

1.3 Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis es realizar aportaciones en la temática de redes de sensores para la monitorización de variables ambientales. Dado el amplio espectro de este objetivo, este se dividió en los siguientes:

- 1) **Investigar los sistemas energéticamente autónomos para monitorización inalámbrica con conectividad directa a Internet.** Dentro del ámbito de la medida de variables físicas en viviendas, se planteará el análisis de metodologías de *energy harvesting*, bajo consumo energético, sostenibilidad energética de dispositivos y protocolos IP de comunicación inalámbrica.
- 2) **Diseñar y evaluar un sistema de monitorización inalámbrico no supervisado** para el análisis de variables físicas en zonas ecológicas protegidas. Dadas las características del entorno y la aplicación, se abordarán problemas como el bajo consumo energético, nodos móviles con trayectorias no predecibles, comunicaciones de amplio rango en entornos adversos y el despliegue en ambientes hostiles para implementaciones electrónicas.
- 3) **Investigar las metodologías de diseño WSN** que permitan analizar los aspectos más relevantes de las distintas etapas de estos sistemas en su implementación. Para ello se recopilarán técnicas de diseño y desarrollo de WSN y se estudiarán distintas propuestas de metodología que engloben los aspectos físicos que componen una red, los protocolos de comunicaciones y la visión de proyecto.

Asimismo, para la consecución de los objetivos antes mencionados, se han definido las siguientes metas:

- **Analizar las necesidades específicas de cada escenario de aplicación y su entorno de desarrollo.** Buscando definir las funcionalidades de los dispositivos de las WSN y extraer los requerimientos necesarios para lograr los objetivos de cada caso de estudio, tales como las variables a monitorizar,

frecuencia de muestreo, autonomía requerida, limitaciones, etc. Paralelamente se busca comprender las posibles adversidades del entorno que pudieran afectar a los sistemas y el tipo de despliegue necesario.

- **Evaluar el estado del arte de WSN en cada escenario**, para determinar las características deseadas en este tipo de implementaciones y los nichos de oportunidad existentes.
 - **Analizar y evaluar protocolos de comunicaciones inalámbricas**, de acuerdo a sus características intrínsecas (conectividad IP, topología, consumo energético, rango de transmisión, etc.), buscando identificar las ventajas y desventajas que brindan las alternativas disponibles para cada caso de estudio.
 - **Estudiar las metodologías y estrategias de diseño electrónico de bajo consumo y *energy harvesting* para WSN**, con la finalidad de minimizar la huella energética de los dispositivos para cada escenario, logrando incrementar la autonomía y longevidad de la red en su totalidad.
-

1.4 Metodología

Como se puede apreciar en el marco de desarrollo, el enfoque principal de la tesis es de tipo práctico, basándose en proyectos con necesidades reales; motivo por el cual se tienen objetivos con una temática similar, pero con distintos enfoques. Con esto en mente, se ha aplicado el método científico, a manera general, para la resolución de las diferentes hipótesis planteadas en cada capítulo.

1.4.1 Sistema autónomo de monitorización inalámbrica.

En el capítulo 3 se plantea la siguiente hipótesis: se podría desarrollar un sistema energéticamente autónomo para monitorización ambiental con conectividad IP directa. Esta misma se busca comprobar específicamente en un entorno de vivienda, donde se tiene como objeto de estudio los sistemas de calefacción centralizados (SCC).

La primera fase de investigación literaria en artículos científicos y reportes técnicos tuvo como objetivo entender las necesidades y retos que se presentan. Para esto, fue necesario realizar un análisis de las normativas de regulación, el funcionamiento de los SCC y el entorno de aplicación. Por otro lado, se realizó un análisis del estado del arte de aplicaciones de monitorización en el hogar, enfocándose específicamente en implementaciones con WSN. Dentro de esta temática se profundizó en los estudios de bajo consumo energético y *energy harvesting*, dada la necesidad de autonomía energética del sistema, además de comunicaciones inalámbricas. Esto permitió concretar los métodos para diseño de *hardware* y *firmware* para un nodo energéticamente auto-sostenible, definir las

fuentes de *harvesting* más relevantes en la vivienda y contrastar estudios de arquitectura de estos últimos. Además, se demostró la escasez de implementaciones WSN con conectividad directa a Internet, siendo favorecido el uso de otros protocolos con puertas de enlace IP, y se analizaron los distintos protocolos inalámbricos, disponibles al momento del estudio, basados en el estándar 802.11.

Con la información obtenida, se definió y desarrolló la arquitectura del sistema, el cual utilizaría un protocolo WiFi y una etapa de *energy harvesting* como fuente de alimentación. Este *hardware* fue sometido a diversas pruebas de caracterización en laboratorio, con las cuales se describió a fondo cada bloque del sistema y se validó su funcionamiento. Por último, el sistema en conjunto fue sometido a ensayos en la vivienda, con los cuales fue posible ratificar la hipótesis previamente definida y validar el uso de sistemas de monitorización WiFi dentro de las WSN

Los análisis y resultados realizados en este capítulo, fueron publicados en un congreso internacional y posteriormente ampliados en un artículo en revista científica de impacto.

1.4.2 Sistema de monitorización ambiental no supervisado.

Basándose en los objetivos planteados anteriormente, se define la siguiente hipótesis: sería viable el uso de WSN en sistemas de monitorización inalámbrico con nodos no supervisados en zonas marítimas extensas. Dicha hipótesis se busca comprobar en una zona ecológica protegida, donde se desea estudiar distintas variables físicas sobre la línea costera.

Como primer paso, se analizaron los sistemas de monitorización marina y el área de interés. El objetivo de esto es identificar los retos a los que se enfrentan este tipo de implementaciones y sus limitantes. Posteriormente, se estudiaron diversas aplicaciones de la índole de WSN y soluciones tecnológicas en entornos marinos, buscando casos de éxito y nichos de mejora. Dentro de estos, las redes híbridas de WSN y vehículos no tripulados destacaron notablemente.

Dada la naturaleza de los nodos no supervisados, se indagó en la literatura métodos de comunicación inalámbrica con los cuales poder suplir esta necesidad, haciendo énfasis en protocolos de largo alcance y bajo consumo energético.

Tras los estudios realizados, se presentó la propuesta de arquitectura del sistema, donde se optó por utilizar protocolos LPWAN como bloque de comunicaciones de una WSN asistida por vehículos no tripulados. Posteriormente, se realizaron diversos análisis a la tecnología de comunicaciones inalámbricas, buscando definir sus características y capacidades. Aunado a esto, se diseñaron los distintos dispositivos de la red, el *firmware*

de cada uno y un protocolo de red, los cuales fueron sometidos a diversas pruebas de validación.

Los distintos nodos y tecnologías mencionados, se integraron con el resto del sistema para la realización de pruebas en laboratorio, donde se evaluó la estabilidad en las comunicaciones, interacciones entre los módulos de RF y calidad del sistema. Consecuentemente, el desarrollo en conjunto fue probado en un entorno similar al del área de estudio, donde se realizaron diversas pruebas de validación y precisión de los datos. Con los resultados obtenidos se realizaron mejoras al sistema en distintas áreas para garantizar su debido comportamiento y se repitieron las pruebas de campo de manera satisfactoria. Dicho sistema se encuentra actualmente en uso en la zona de interés.

Por último, los distintos estudios de LoRa, el sistema desarrollado y sus resultados fueron publicados en dos revistas científicas y en un congreso internacional.

1.4.3 Diseño de WSN

El desarrollo práctico de sistemas WSN conlleva el análisis de distintos parámetros del *hardware* y de los protocolos de comunicación que se utilizan. En la literatura se pueden encontrar distintos métodos para el diseño de WSN, cada uno con perspectivas diferentes o con enfoques específicos a características de la red; los cuales no siempre presentan un claro camino a seguir. Por tal motivo, se planteó la siguiente hipótesis: los distintos aspectos de las WSN podrían ser analizados sistemáticamente bajo una metodología de diseño de redes.

En primer lugar, fue necesario hacer un estudio de los distintos aspectos relevantes al diseño de una red, recopilando información de diversas publicaciones, la cual se aunó al conocimiento empírico adquirido en los sistemas desarrollados. Para ello, se consideraron principalmente artículos de casos de aplicación donde se detallaba el proceso seguido en el diseño de las WSN. Además, se incluyeron algunos estudios específicos sobre el diseño de redes; aunque cabe aclarar que estos últimos resultan poco abundantes.

Con la información recopilada, se seleccionaron los parámetros de mayor influencia en el diseño de WSN y se clasificaron en categorías relacionadas a distintos aspectos del *hardware*, comunicaciones inalámbricas y requerimientos de proyecto. A su vez, se propusieron distintas etapas de diseño en las que se sugiere como utilizar los parámetros seleccionados y las actividades necesarias a realizar.

Para evaluar la metodología propuesta, ésta se aplicó a distintos escenarios bajo un mismo entorno físico. En estos casos de aplicación, se compararon diferentes protocolos de comunicaciones para denotar el uso de la metodología con diversas tecnologías, y el impacto que tienen en el proceso de selección. Esta evaluación se llevó a cabo extrayendo los parámetros de análisis anteriormente mencionados y siguiendo las directrices sugeridas.

Actualmente se está trabajando para plasmar esta metodología en un artículo científico, el cual se plantea enviar a la revista *Sensors*.

1.5 Estructura de la tesis

Como se puede apreciar en los objetivos, marco de desarrollo y metodología, la presente tesis engloba aspectos variados de las redes de sensores inalámbricas. Por este motivo y con el objetivo de facilitar la lectura, se ha optado por un capítulo de estado del arte en el que se presenta una visión general de los temas a abordar para, posteriormente, en cada capítulo, presentar un estado del arte más detallado. Dicho esto, el presente documento se encuentra estructurado de la siguiente forma:

- **Capítulo 1: Introducción.** En este primer capítulo se presenta la motivación por la cual se buscó desarrollar la presente tesis, definiendo los objetivos, el marco de desarrollo de la misma y la metodología utilizada en cada etapa de la implementación de los sistemas propuestos. Finalmente se muestra la estructura que rige este trabajo, permitiendo al lector tener una perspectiva global de la tesis desarrollada.
- **Capítulo 2: Estado del arte.** En este capítulo se hace referencia a las redes de sensores inalámbricas desde una perspectiva histórica y de sus campos de aplicación, con lo que se pondrá en perspectiva al lector sobre el tema a tratar de una manera generalizada. Adicionalmente se define la arquitectura básica de un nodo de WSN, donde se hace énfasis en los bloques más relevantes de esta arquitectura, se realiza una descripción del término *energy harvesting* y se presenta un estudio de los protocolos de comunicación más relevantes para las áreas de interés; analizando sus características particulares y mostrando diversas implementaciones que ejemplifican la importancia de los protocolos. Finalmente, se realiza un análisis de las métricas y métodos de diseño para WSN.
- **Capítulo 3: Sistema autónomo para monitorización de viviendas.** Se presenta una problemática centrada en la medición de variables en hogares y edificios, donde se busca estimar el consumo energético-térmico de los sistemas de calefacción. Posteriormente, se muestran implementaciones existentes, pertinentes a la temática, teniendo así una base comparativa. Con esto, se plantea la propuesta de monitorización, donde se define el *hardware* de la arquitectura central y la fuente de alimentación de la misma, además del comportamiento de su *firmware*. Ambos bloques son caracterizados y evaluados en entornos de laboratorio y en el entorno de interés. Por último, se exponen los resultados obtenidos y se realiza una discusión sobre estos mismos, culminando en las conclusiones sobre el trabajo.
- **Capítulo 4: Sistema de monitorización para zonas ecológicas protegidas.** Se expone una necesidad existente sobre el análisis de variables marítimas y ambientales en reservas naturales protegidas de una manera más detallada, económica y sencilla

de implementar. En base a esto, se presentan los diversos retos presentes en los despliegues electrónicos en ambientes marinos y se realiza una evaluación del estado del arte de los métodos más comunes para captar estas variables, así como de las nuevas prácticas realizadas por investigadores. Posteriormente, se plantea la arquitectura del sistema propuesto, definiendo los distintos escenarios de comportamiento deseados. Aunado a esto, se describen los componentes que forman la red, las actividades que realizan dentro de ella y los dispositivos adicionales de la misma. El sistema monitorización inalámbrico es caracterizado y evaluado a nivel de red, tanto en laboratorio como en campo. Por último, se integran los componentes de la red con los dispositivos oceanográficos para su validación, sobre la cual se presenta una discusión sobre los resultados obtenidos y las conclusiones correspondientes.

- **Capítulo 5: Métricas para el análisis, selección y diseño de una WSN.** Con el aprendizaje obtenido en los proyectos realizados, se presenta una propuesta de metodología y métricas para el diseño, selección y desarrollo de una WSN en cualquier campo de aplicación. De manera inicial, se realiza una evaluación de los distintos estudios presentes en la literatura, la cual se emplea como base para la propuesta. De este análisis, se extraen métricas para su clasificación e integración dentro de la metodología desarrollada. Para la validación de esta misma, se realiza un estudio en un edificio con distintos protocolos y casos de aplicación, haciendo énfasis en la importancia del análisis de las métricas de *hardware*, red y aplicación. Por último, se presenta una discusión sobre la propuesta realizada y las conclusiones observadas.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro.** Este último capítulo muestra las conclusiones globales obtenidas en el desarrollo de esta tesis, haciendo énfasis en las contribuciones más relevantes de la misma. Adicionalmente, se presentan las posibles líneas futuras de desarrollo e investigación observables en estos campos.

Capítulo 2: Estado del Arte

En este capítulo se hace referencia a las redes de sensores inalámbricas desde una perspectiva histórica y de sus campos de aplicación, con lo que se pondrá en perspectiva al lector sobre el tema a tratar de una manera generalizada. Adicionalmente se define la arquitectura básica de un nodo de WSN, donde se hace énfasis en los bloques más relevantes de esta arquitectura, se realiza una descripción del término energy harvesting y se presenta un estudio de los protocolos de comunicación más relevantes para las áreas de interés; analizando sus características particulares y mostrando diversas implementaciones que ejemplifican la importancia de los protocolos. Finalmente, se realiza un análisis de las métricas y métodos de diseño para WSN.

2.1 WSN en la historia y en el mundo

La constante monitorización de variables físicas y ambientales se ha convertido en un tema de gran importancia en las últimas décadas. Cada día se requiere, y desea, tener un mayor control sobre los eventos que nos rodean para prevenir incidentes, entender cambios ambientales, mejorar la calidad de vida, concienciar a la población, etc. De la mano de esto, también se buscan maneras de reducir las decisiones que deban tomar los usuarios, teniendo respuestas intuitivas y eficientes por parte de sistemas autónomos.

Una de las herramientas principales usadas para lograr estos objetivos son las Redes de Sensores Inalámbricas, o WSN por sus siglas en inglés. Estas mismas pueden ser definidas como un conjunto de dispositivos intercomunicados capaces de recolectar diversos tipos de datos ambientales para su análisis y procesamiento. Esta tecnología, así como muchas otras, fue inicialmente desarrollada con propósitos militares, teniendo quizá

su primera implementación en el proyecto SOSUS (*Sound Surveillance System*) (Weir and US Naval History Center, 2006) donde se buscaba detectar y seguir submarinos soviéticos en los años 50. Sin embargo, con el paso del tiempo, su uso empezó a ser más común en universidades y centros de investigación, donde se buscaba aplicar estas WSN en temas de prevención de desastres y protección ecológica (Silicon Labs, 2013b; Jindal, 2018).

Hoy en día sus aplicaciones son mucho más extensas y heterogéneas, siendo empleadas en materia de ciudades inteligente (Andreadou, Guardiola and Fulli, 2016; Petajarvi *et al.*, 2016; Lu *et al.*, 2018), preservación ambiental (Dominguez-Morales *et al.*, 2016; Dressler *et al.*, 2016; Molina-Pico *et al.*, 2016a), procesos industriales (Burghardt *et al.*, 2014; Salam and Khan, 2016) y, como las ya mencionadas, aplicaciones militares. Las ciudades inteligentes y la preservación ambiental representan el enfoque principal de los casos de aplicación de la presente tesis.

El tema de ciudades inteligentes es muy diverso, donde se incluyen estudios en materia de salud, domótica, contaminación, infraestructura, sostenibilidad o vialidad. Dentro de la literatura se pueden encontrar propuestas en esta temática como las de Dey *et al.* (Dey *et al.*, 2017) o Fang *et al.* (Fang *et al.*, 2016), quienes proponen sistemas de monitorización de signos vitales en tiempo real para hospitales o en el hogar; Brito *et al.* (Brito *et al.*, 2014) presentan un sistema inteligente de control para la climatización en viviendas a través de una red local inalámbrica; Asensio *et al.* (Asensio *et al.*, 2015) implementaron el uso de una WSN capaz de analizar e interactuar con los sistemas de vialidad en las calles o estacionamientos; o Rizwan *et al.* (Rizwan, Suresh and Babu, 2016), quienes proponen una red de sensores embebidos en las carreteras capaces de transmitir información del tráfico para análisis en tiempo real.

Por otro lado, en la preservación ambiental el interés se enfoca más hacia la conservación de ecosistemas, prevención de desastres o procesos de industria primaria como la agricultura, ganadería, extracción de petróleo o minería. Algunos ejemplos de esto son el caso de WellAware, quienes usan WSN para el sensado de sus campos petroleros en EUA (Ingenu, 2016); Paller y Elo (Paller and Éló, 2016), utilizan una red de cámaras con conexiones inalámbricas híbridas para la observación de roedores en campos agrícolas; Aslan *et al.* (Aslan, Korpeoglu and Ulusoy, 2012) presentan una metodología para el uso de redes de sensores inalámbricas para la prevención y detección de incendios forestales; Gor *et al.* (Gor *et al.*, 2017) quienes implementan un sistema de seguridad y rastreo de animales en zonas protegidas o santuarios para especies en riesgo, para evitar que migren fuera de estas áreas a regiones de caza libre; o la aplicación de Llaría *et al.* (Llaría *et al.*, 2015), quienes proponen una plataforma de monitorización para granjas en las montañas, utilizando nodos inalámbricos para localizar vacas en las serranías.

2.2 Redes WSN IoT

Dentro de las WSN, existen distintos tipos de redes y clasificaciones, siendo una de las más relevantes hoy en día los sistemas IoT (*Internet of Things*). Una red IoT se puede definir como una serie de dispositivos o "cosas" interconectadas entre sí y que, en su concepto más estricto, se encuentran enlazados directa o indirectamente al mundo del Internet (Asensio, 2016). Esta última característica es su principal diferenciador del resto de WSN, la cual agrega una capa de complejidad adicional al ya enmarañado mundo de las redes de sensores.

Desde la perspectiva de las redes IoT, existen dos bloques fundamentales que se encuentran en cualquier implementación: el *edge*, que es donde todas las "cosas" físicas se encuentran interconectadas entre sí o con otros dispositivos de mayor poder computacional (International Electrotechnical Commission, 2016), y la nube o *cloud*, que se encuentra conformada principalmente por servidores para almacenamiento o análisis de datos (Truong and Dustdar, 2015; Ghahramani, Zhou and Hon, 2017). Dentro de las redes IoT existen diversas arquitecturas de conectividad que utilizan estos dos conceptos, dentro de los cuales los más comunes son el *edge-to-cloud*, donde los dispositivos finales tienen una conexión IP directa, y el *gateway-mediated edge*, donde los dispositivos finales cuentan con una puerta de enlace IP que funge como intermediario con la nube (Fremantle, 2015; International Electrotechnical Commission, 2016) (Figura 1).

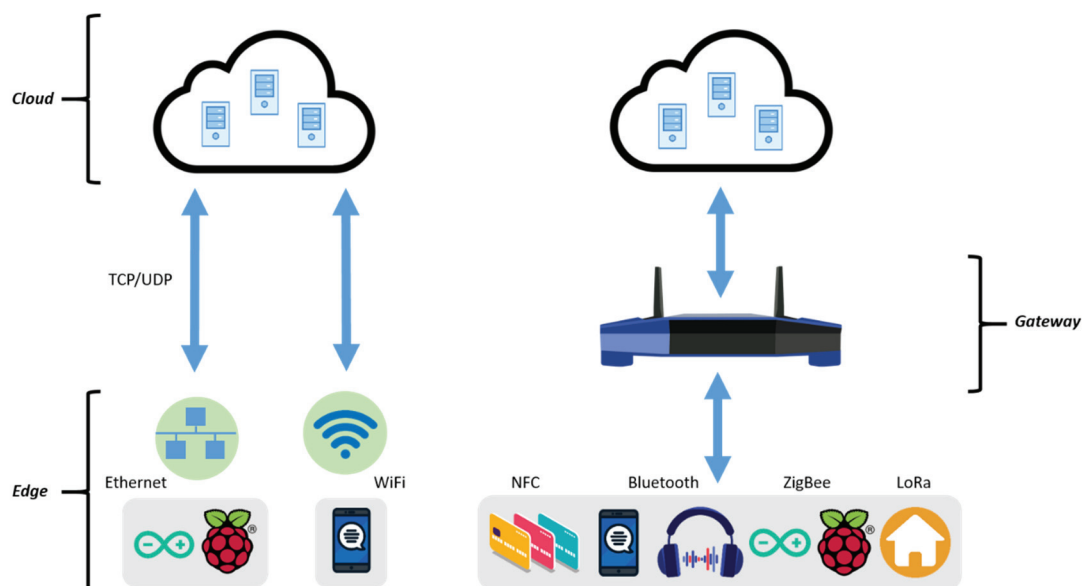


Figura 1 – Arquitecturas de conectividad IoT más comúnmente implementadas.

Tomando como base estos modos de conectividad y analizándolos desde una perspectiva de *hardware*, los sistemas de IoT se encuentran conformados por tres tipos de dispositivos principalmente:

- Dispositivos de percepción.- Esta clasificación agrupa todas las “cosas” encargadas de recolección de datos o activación de otros dispositivos dentro de la red. El dispositivo sensor es el elemento más fundamental de este grupo y se encarga principalmente de capturar datos ambientales que serán reenviados a los dispositivos de red (Khan *et al.*, 2012). Se considera nodo de percepción, el que tiene como función principal la captación de datos ambientales, aunque en algunos casos pueden llegar a realizar algún tipo de procesamiento de datos de bajo nivel o la activación de actuadores. A manera general, los nodos de percepción tienden a requerir un bajo nivel de poder computacional.
- Dispositivos de red.- Como su nombre sugiere, este grupo se encuentra conformado por módulos de RF que transfieren la información a través de la red, desde el *edge* a la nube, ya sea por medios cableados o inalámbricos (Khan *et al.*, 2012). Estos dispositivos pueden encontrarse embebidos en nodos de percepción o de manera individual. Se considera nodo de red, cuando este se encarga principalmente de la gestión de transmisiones de radiofrecuencia.
- Dispositivos de nube.- Esta clasificación integra dispositivos de alto nivel computacional para el procesado y manejo de los datos proporcionados por los dispositivos de percepción. La información recolectada puede ser utilizada para la asignación de tareas que modifican el comportamiento de los dispositivos de percepción o simplemente puede ser almacenada en una base de datos para uso futuro. Esta clasificación se encuentra formada principalmente de servidores y dispositivos de gestión de datos.

2.3 Comunicaciones inalámbricas en WSN

Las comunicaciones inalámbricas orientadas a WSN presentan características que las distinguen del resto de sistemas de monitorización. Estas tecnologías presentan un enfoque hacia el bajo consumo energético, anchos de banda reducidos, volúmenes de datos a transmitir del orden de los bytes y frecuencias de transmisión UHF (*Ultra High Frequency*), entre otros. Debido al auge de estos sistemas y sus necesidades específicas, una gran variedad de protocolos de comunicación han sido diseñados para cubrir este nicho de oportunidad; aunado a esto, algunas tecnologías ya desarrolladas han sido adaptadas para este mismo propósito (Govindan and Azad, 2015; Akeela and Elziq, 2017).

Dentro de los protocolos para WSN existen múltiples clasificaciones válidas para su diferenciación, algunas se enfocan en su lugar dentro de la arquitectura del modelo OSI

(*Open System Interconnection*) (Day and Zimmermann, 1983), en su topología de red o características. Además de estas, es posible clasificar los protocolos acorde a su cobertura física de red, la cual define y delimita las posibles áreas de aplicación para un protocolo dado (Figura 2).

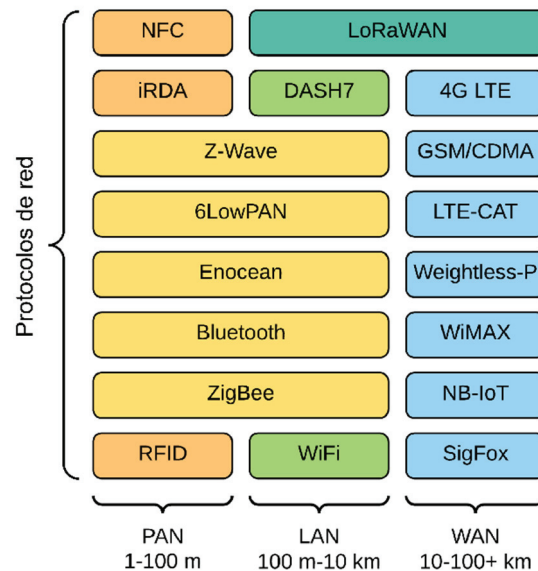


Figura 2 – Ejemplos de protocolos de comunicaciones inalámbricas de acuerdo a su cobertura de red. Las clasificaciones utilizadas significan Personal Area Network (PAN) (anaranjado), Local Area Network (LAN) (verde claro) y Wide Area Network (WAN) (azul). Los protocolos que abarcan PAN y LAN se encuentran en amarillo y los que comprenden LAN y WAN se presentan en color verde oscuro.

En la Figura anterior cabe notar que solo se muestran algunas de las tecnologías más relevantes en la actualidad, ya que existe una plétora de protocolos aplicables a WSN y resultaría difícil mencionarlás todas. Dentro de la clasificación de cobertura de red utilizada en la Figura 2, se pueden apreciar las tres categorías principales, las Personal Area Networks (PAN), Local Area Networks (LAN) y Wide Area Networks (WAN). Estas categorías se diferencian entre sí por sus rangos de distancia de transmisión, lo cual permite a su vez delimitar los protocolos dentro de ciertas áreas de aplicación, aunque existen traslapes de cobertura de red en algunas tecnologías. Es común encontrar una cuarta categoría de cobertura de red conocida como Metropolitan Area Networks (MAN), sin embargo, esta fue omitida ya que se considera una clasificación transicional entre las LAN y WAN.

Dentro de las WAN existe una subcategoría llamada Low-Power WAN (LPWAN), la cual está enfocada a dispositivos de bajo consumo energético y baja tasa de transferencia de datos, conservando la característica de cobertura de red de las WAN. Estas tecnologías comenzaron a surgir en los años 90 con propuestas privadas como las de Alarmnet y ARDIS, aunque el término de LPWAN no se empezó a acuñar hasta alrededor del año 2009 con el surgimiento del protocolo Sigfox (LinkLabs, 2017). Posteriormente, surgirían nuevas tecnologías de tipo LPWAN como LoRaWAN (Adelantado *et al.*, 2017), DASH7 (Weyn *et al.*,

2015) o NarrowBand IoT (Ratasuk *et al.*, 2016), que han ayudado a impulsar las WSN en ciudades inteligentes, como es el caso de la ciudad de Calgary con su red LoRaWAN (Calgary, 2018). Además, las LPWAN pueden ser utilizadas como complemento para tecnologías de red celular y dispositivos inalámbricos de corto alcance (Raza, Kulkarni and Sooriyabandara, 2017a).

Para casos de aplicación como las ciudades inteligentes y preservación ambiental, donde usualmente se requiere hacer despliegues de red muy amplios, se puede observar que los protocolos LAN y WAN resultan ser los más adecuados para estos (Figura 2). Dentro de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas de estas dos clasificaciones, es posible destacar los protocolos de WiFi, ZigBee, tecnologías de redes móviles (4G, GSM/CDMA, LTE CAT) y LoRaWAN por su relevancia en la temática de ciudades inteligentes y/o preservación ambiental.

2.4 Arquitectura general de un nodo

A pesar de la heterogeneidad de las WSN, todos estos sistemas presentan una arquitectura básica y común: al menos un nodo sensor (percepción), encargado principalmente de captar las variables requeridas del ambiente; y un nodo de control (red), que recolectará los datos de los nodos sensores. El nodo sensor, el elemento más básico de una WSN, puede ser representado por cuatro bloques fundamentales de funcionamiento: fuente de energía, procesamiento, captación y comunicaciones inalámbricas, como se muestra en la Figura 3.

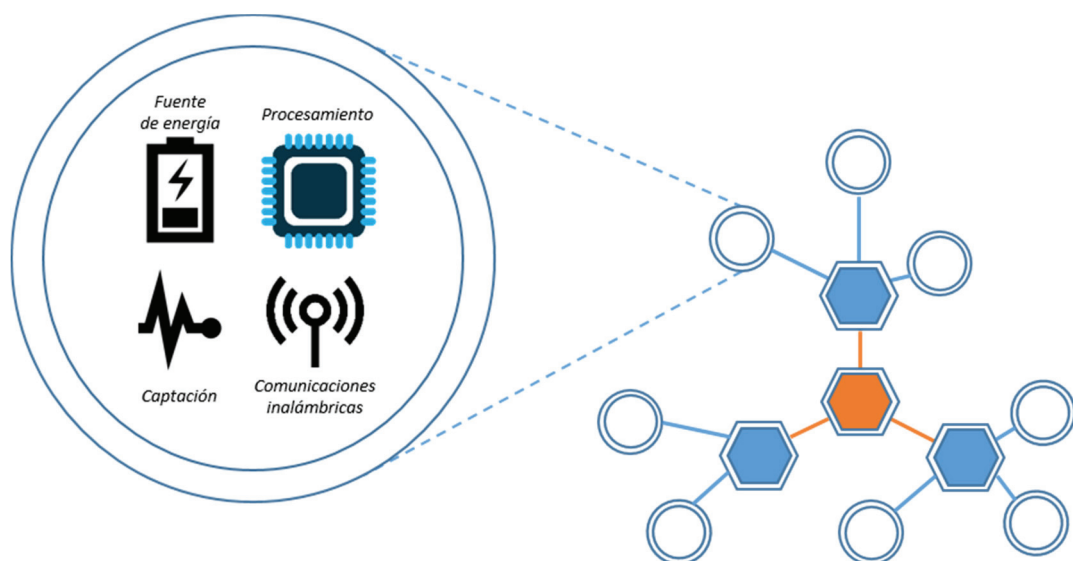


Figura 3 – Arquitectura básica de un nodo en una WSN.

La fuente de energía, como su nombre lo sugiere, es la etapa que provee al resto del nodo con la energía necesaria para su funcionamiento. Este bloque tiende a estar conformado por reservorios energéticos, tales como baterías primarias y baterías secundarias; o generadores de potencia eléctrica para el nodo. El bloque de procesamiento se encuentra formado principalmente por microcontroladores, memorias no volátiles, entre otros. Esta etapa se encarga fundamentalmente de la gestión de los datos obtenidos por los sensores y las actividades del nodo, como la administración de los modos de bajo consumo energético, la encriptación de datos o la transferencia de la información a algún periférico. Las comunicaciones inalámbricas realizan el intercambio de información relevante a las puertas de enlace del sistema u otros nodos; ya sea los datos de los sensores, el estado de la batería o el modo de operación actual del microprocesador. En esta etapa se encuentran los *transceivers* de los protocolos, pudiendo ser uno o múltiples a la vez. Por último, el bloque de captación es donde se encuentran los diversos sensores del nodo, los cuales se encargan de captar las variables físicas de interés como humedad, temperatura o luminosidad, además de circuitos de acondicionamiento de señal y amplificadores.

Como se puede apreciar, cada de estos bloques tiene un propósito singular dentro de la arquitectura; no obstante, existe un denominador común entre ellos que los relaciona intrínsecamente: el consumo energético. Esto se debe a que mientras una etapa busca proveer la energía necesaria para el funcionamiento del nodo en un intervalo de tiempo deseado, las otras consumen un porcentaje elevado de este recurso para poder realizar sus distintas actividades. La constante búsqueda de la optimización de este recurso ha sido uno de los retos que se han impuesto en las WSN, lo cual ha exigido una investigación de la tecnología utilizada en cada uno de estos bloques. Por un lado, en los bloques de procesamiento, captación y comunicaciones los estudios se han orientado hacia el uso eficiente del recurso energético; por otro lado, en las fuentes de energía se estudian materiales para incrementar la capacidad de almacenamiento, etapas de acondicionamiento energético o fuentes capaces de proveer energía de manera continua y estable del ambiente, es decir, *energy harvesters*.

El término de *energy harvesting* se puede definir como un mecanismo utilizado para generar energía a partir del entorno de una red y con la cual se busca proveer una fuente de potencia para un nodo o WSN (Shaikh and Zeadally, 2016a). A diferencia de otros métodos de captación de energías del entorno, los módulos de *energy harvesting* son capaces de capturar pequeñas magnitudes del ambiente para ser utilizado en un dispositivo en particular. Esta energía puede ser utilizada al momento o almacenada para su uso posterior, siendo la segunda opción la más común debido a la naturaleza de demanda de los nodos sensores.

Existen múltiples posibles fuentes de *energy harvesting*, las cuales no solo varían en su origen, sino también en la magnitud de energía que son capaces de proveer a los

dispositivos de WSN. La clasificación más común es de acuerdo a su origen o el entorno de extracción, tal y como se muestra en la Tabla 1, donde se presentan las fuentes más relevantes.

Tabla 1 – Fuentes de energy harvesting más comunes y sus densidades aproximadas (Han *et al.*, 2013; Hannan *et al.*, 2014; Fadhlullah and Ismail, 2015; Raza Zaidi *et al.*, 2015; Nechibvute *et al.*, 2017).

Origen	Tipo	Densidad	Dispositivos de captación
Radiación	Solar - Exteriores	10-100 mW/cm ²	Celda solar
	Solar - Interiores	10-100 μW/cm ²	Fotodiodo
	Electromagnético	0.1-10 mW/cm ²	Inductores Rectoantenas
Térmico	Radiofrecuencia	0.1-1 μW/cm ²	Antenas receptoras
	Termoeléctrico	1-10 mW/cm ²	Celdas Peltier Termopilas
Vibraciones	Mecánico	1-100 μW/cm ²	Piezoeléctrico
	Humano	1-10 μW/cm ²	

Además de las fuentes mencionadas en la tabla anterior, existen otros tipos como las de origen bioquímico, radioactivo, infrarrojo o generación por flujo, las cuales fueron omitidas al no ser directamente aplicables al marco de estudio de este trabajo.

Como se muestra en la Tabla 1, las fuentes de *energy harvesting* resultan muy heterogéneas y cada una presenta una forma particular para su captación, además de un rango de densidad específico. No obstante, la arquitectura de sistema de un bloque de *energy harvesting* es unívoco, sin importar su origen, y se encuentra compuesto de tres partes fundamentales: el elemento de captación (transductor), una etapa de gestión energética y un bloque de almacenamiento (Figura 4).

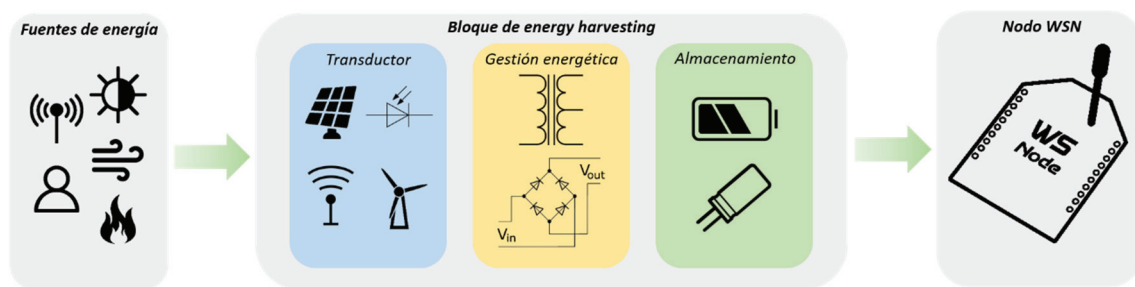


Figura 4 – Energy harvester desglosado en sus partes fundamentales

Por un lado, los elementos de captación se encargan de transformar la energía en voltaje y corriente, mientras la etapa de gestión busca acondicionar esa potencia de entrada para proveer los niveles necesarios al nodo que se busca energizar; esta última se encuentra formada por rectificadores de onda, elevadores de voltaje, reguladores lineales, etc. Por último, el bloque de almacenamiento se encarga de acumular la energía para su futuro uso y, comúnmente se encuentra formada por supercondensadores o baterías secundarias.

Cabe resaltar que la etapa de almacenamiento no es obligatoria, ya que algunos sistemas de *harvesting* no la requieren.

A pesar de ser un tema de estudio de alta relevancia, el *energy harvesting* aún presenta diversos retos a cumplir, siendo quizá el más importante el maximizar la eficiencia de conversión de la energía del origen a potencia eléctrica. Este desafío implica avances tecnológicos tanto en los materiales y métodos de captación, donde se busca percibir los niveles de energía ambiental más bajos posibles, como en la etapa de gestión, donde se pretende mejorar el aprovechamiento de la energía recibida y evitar pérdidas en el acondicionamiento. Ejemplos de esto se puede ver en el trabajo de Guan *et al.* (Guan *et al.*, 2017), quienes diseñaron un circuito de *energy harvesting* en dos fases para captar distintos niveles de potencia de entrada utilizando algoritmos de MPPT (*maximum power point tracking*) para mejorar la eficiencia de conversión termoeléctrica; Wang *et al.* (Wang *et al.*, 2015), quienes presentan un nuevo material hecho de nanoestructuras de titanio que mejoran la absorción de los rayos solares; Zhang *et al.* (Zhang *et al.*, 2017), quienes diseñaron una turbina rotativa con elementos piezoeléctricos ajustables a distintas incidencias del viento para poder captar una mayor cantidad de vibraciones y mejorar la captación; o en el de Abouzied *et al.* (Abouzied, Ravichandran and Sanchez-Sinencio, 2017), que presentan un *energy harvester* de radiofrecuencia con una etapa de rectificación AC/DC reconfigurable de acuerdo a las frecuencias captadas por una antena de 915 MHz.

Aún con estos retos, hoy en día la implementación de este tipo de alternativas a fuentes energéticas convencionales se ha extendido a través de diversos campos de aplicación (Chottirapong *et al.*, 2015; Mihajlovic *et al.*, 2015; Saida *et al.*, 2016; Visconti *et al.*, 2016; Wijesundara *et al.*, 2016), tanto para extender la vida útil de sistema como para minimizar el uso de baterías primarias y mantenimiento.

Capítulo 3: Sistema autónomo para monitorización de viviendas

Se presenta una problemática centrada en la medición de variables en hogares y edificios, donde se busca estimar el consumo energético-térmico de los sistemas de calefacción. Posteriormente, se muestran implementaciones existentes, pertinentes a la temática, teniendo así una base comparativa. Con esto, se plantea la propuesta de monitorización, donde se define el hardware de la arquitectura central y la fuente de alimentación de la misma, además del comportamiento de su firmware. Ambos bloques son caracterizados y evaluados en entornos de laboratorio y en el entorno de interés. Por último, se exponen los resultados obtenidos y se realiza una discusión sobre estos mismos, culminando en las conclusiones sobre el trabajo.

3.1 Introducción

Uno de los temas que ha cobrado gran importancia en las últimas décadas es el control de consumo energético en entornos urbanos. Esto se debe fundamentalmente al incremento del coste de la energía y a la demanda generada por distintos tipos de electrodomésticos y sistemas de calefacción. Dicha demanda es muy variada dependiendo de factores como el nivel de uso y temporada del año; sin embargo, su consumo no siempre es del todo entendido por parte de los usuarios. Proporcionar a los consumidores información relativa al consumo real de cada dispositivo crea un entendimiento de la

variabilidad del consumo energético en un periodo de tiempo, además permitir reconocer el posible mal funcionamiento de un electrodoméstico. Esta falta de conocimiento ha generado una demanda grande en el mercado para dispositivos de monitorización que permitan proveer este tipo de información a los usuarios. Este nicho se ha buscado llenar con distintas herramientas tecnológicas, entre ellas, una de las más utilizadas son las WSN, las cuales presentan arquitecturas de sistemas altamente flexibles, utilizando distintos medios de comunicación, almacenamientos energéticos y sensores.

Uno de los sistemas de mayor consumo energético en los hogares en Europa son los sistemas de calefacción, los cuales habitualmente están compuestos por múltiples radiadores de calor distribuidos en los distintos espacios de la vivienda. Quizá el más común de éstos en Europa son los de calefacción centralizada (CC), el cual se divide en distribución en anillo y en columna (Figura 5).

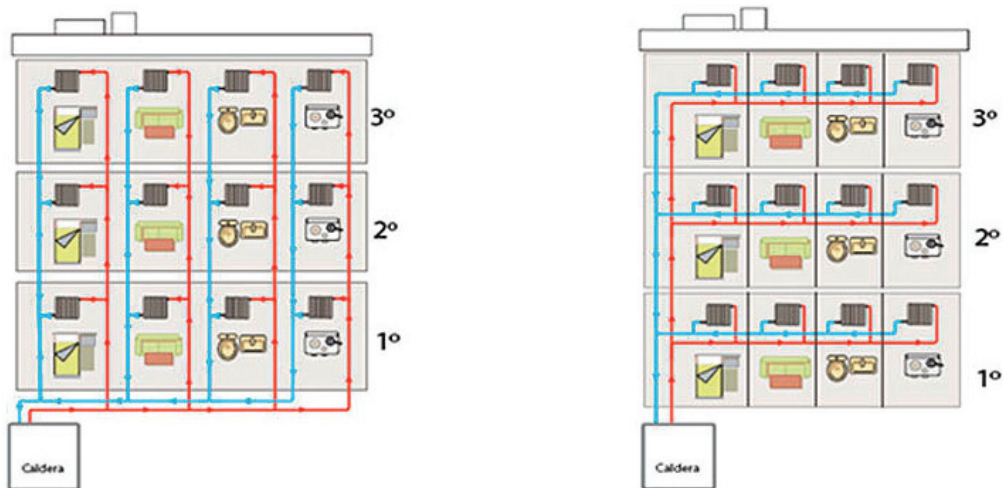


Figura 5 – Distribución por columnas (izquierda) y en anillo (derecha).

Las instalaciones en anillo son sistemas más recientes que los de columna, que además permiten una contabilización del uso del sistema CC por vivienda de manera individual, mientras que la distribución por columnas no permite este tipo de mediciones. En España aún existen más de un millón de domicilios que cuentan con sistemas de CC (Instituto Nacional de Estadística, 2011) y, de acuerdo a un estudio realizado en Italia, donde estos sistemas también son comunes, éstos presentan una baja eficiencia energética comparada a los sistemas independientes o en anillo (Zago *et al.*, 2011). Debido a la naturaleza de los sistemas CC en columna, el coste de la energía utilizada es repartido en base a cálculos relativos, como las dimensiones de las viviendas, entre los distintos domicilios sin tomar en cuenta el consumo individual de estos. Al no tener ningún tipo de control efectivo o mecanismo de monitorización en estos sistemas, además de los patrones de comportamiento de usuarios poco conscientes (Guerra Santin, Itard and Visscher, 2009), genera entornos de poco interés hacia la eficiencia energética y se opta por buscar el nivel de confort a cualquier costo. Según estudios realizados en el ámbito de consumo energético

y su relación con patrones de comportamiento (Guerra Santin, Itard and Visscher, 2009; Guerra Santin, 2011), también existe una correlación directa entre el nivel de ingresos y la edad de los usuarios en las viviendas con el nivel de consumo. En los casos de ingresos bajos, personas solteras y jóvenes, los niveles energéticos son bajos ya que en su mayoría tienden a estar poco tiempo en la vivienda o su economía no les permite el uso continuo de servicios como la calefacción. Por otro lado, en el sector económico alto y en las personas mayores de 60 años, su vida sedentaria y su despreocupación por los gastos generados llevan a consumos excesivos. Sin embargo, cabe resaltar, que en todos los sectores económicos y en todos los rangos de edad, a manera general existe poco interés por el ahorro energético o el uso eficiente del mismo, siendo la verdadera limitante el factor económico lo cual inclina a los usuarios a un uso un poco más moderado.

De acuerdo a la directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de Eficiencia Energética, en su artículo 9 (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2012) y el Real Decreto-ley 8/2014 de aprobación de medidas urgentes para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia (Ministerio de la Presidencia - Relaciones con las Cortes e Igualdad, 2014), los clientes finales de este tipo de servicios deberán tener contadores individuales a un precio competitivo, que reflejen el consumo real de energía del usuario y que proporcionen información de uso en tiempo real. Debido a esto, se requiere hacer una regularización en las viviendas en España con contadores de consumo individual, tanto en edificios con calefacción central como independiente. Conociendo el gasto energético individual, se puede identificar las zonas donde se le da un uso excesivo al sistema de calefacción y así poder gestionar más cuidadosamente su uso, generando una mayor concienciación energética. Según estudios realizados por la Asociación Europea de Repartidores de Costes de Calefacción (EVVE), la Asociación Española de Repartidores de Costes de Calefacción (AERCCA) y el Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético (IDAE), con el uso de estos dispositivos se podrá generar un ahorro económico de hasta el 30% (Asociación Española de Repartidores de Costes de Calefacción, 2019).

Es por esta problemática que la motivación de este capítulo es la de contribuir al cumplimiento de las nuevas normativas implementadas y ayudar a desarrollar una cultura de consciencia energética. Esto se pretende lograr mediante la creación de una alternativa de monitorización que permita realizar análisis *in situ* para sistemas de calefacción centralizado, proporcionando un método para gestionar el uso de este recurso de una manera responsable y manteniendo un equilibrio entre nivel de confort y consumo energético.

Para entender un poco más del tema e identificar las posibles áreas de mejora para aplicaciones de este tipo, en la siguiente sección se realizará una descripción de sistemas y tecnologías relevantes al momento del estudio, para así poder esclarecer las diferencias y aportaciones del sistema propuesto.

3.2 Estado del arte y aplicaciones específicas

3.2.1 Comunicaciones inalámbricas en WSN

El uso de dispositivos sensorizados en entornos domésticos y ciudades se ha incrementado notablemente debido a problemáticas como la anterior. Dependiendo del objeto de monitorización, los nodos sensores tienden a ser muy variados, tanto en la electrónica de sensado como en las comunicaciones inalámbricas que se utilizan. En escenarios de vivienda, es posible encontrar implementaciones con comunicaciones de corto alcance como Bluetooth (Kumar and Lee, 2014), ultra wideband (Verhelst *et al.*, 2015) e incluso transmisión de datos por infrarrojo (Tiwari, Sewaiwar and Chung, 2015), así como también protocolos de alcance medio de tipo ZigBee (Tiwari, Sewaiwar and Chung, 2015) o WiFi (Wang, Peng and Zhang, 2015).

De los anteriormente mencionados, quizá uno de los más comúnmente utilizado en WSN para entornos urbanos inteligentes es el protocolo ZigBee. Éste se basa en el estándar 802.15.4 de la IEEE (IEEE Standards Associations, 2016), el cual define la capa PHY y MAC para redes inalámbricas PAN, diseñado específicamente para su uso en aplicaciones de monitorización inalámbrica. Este protocolo se caracteriza por transmisiones a corta distancia, con un bajo consumo energético y baja tasa de transferencia de datos (Lee, Dong and Sun, 2015; Raza, Kulkarni and Sooriyabandara, 2017b), lo cual lo hace ideal para su uso con dispositivos para uso en interiores (ZigBee Standards Organization, 2008). Además, presenta una gran capacidad de escalabilidad de red y una topología de red tipo malla, lo cual permite expandir su cobertura más allá del rango de transmisión usual entre dos nodos (10-100 m) con múltiples saltos entre dispositivos ZigBee. El protocolo define tres tipos de dispositivos principales dentro de una red: los ZigBee *End Devices* (ZED), ZigBee *Router* (ZR) y ZigBee *Coordinator* (ZC), cada uno con funcionalidades distintas dentro de la red. El ZED es el dispositivo más sencillo de todos, ya que solo es capaz de enviar datos a un nodo de mayor jerarquía. Este dispositivo requiere poca capacidad computacional y es el de menor consumo energético, por lo que es común encontrarlo en nodos sensores. Los ZR son dispositivos intermediarios de la red capaces de, como su nombre lo sugiere, redirigir o “enrutar” datos entre dispositivos de menor jerarquía a otros de mayor jerarquía o viceversa; además, funcionan como reclutadores de nodos adicionales dentro de la red. Por último, los ZC son los encargados de crear y administrar los distintos aspectos de la red, además de ser capaces de realizar las mismas funciones de un ZR. Los ZC son los dispositivos más complejos y de mayor jerarquía en una red ZigBee, estando comúnmente enlazados a una puerta de enlace u otros tipos de redes como WiFi. La frecuencia de operación de ZigBee es comúnmente la de los 2.4 GHz, aunque también es posible trabajar

en frecuencias de 915 MHz y 868 MHz. La diferencia entre estas frecuencias es, primordialmente, la velocidad de transferencia de datos (250 – 10 Kbps), el número de canales disponibles (63 – 16 canales) y la distancia de transmisión (1000 – 10 m), para la cual las frecuencias sub GHz tienen el mayor rango de distancia (Zigbee, 2015).

Debido a su bajo consumo como protocolo de comunicaciones, ZigBee puede ser encontrado en una gran variedad de aplicaciones para ciudades inteligentes, algunos ejemplos de ello son el trabajo de Han *et al.* (Han *et al.*, 2014) quienes proponen un sistema de monitorización energético en el hogar con comunicaciones ZigBee y PLC, donde se transmiten datos de consumo a un servidor central para su análisis y gestión de los recursos por parte del usuario; Kelly *et al.* (Kelly, Suryadevara and Mukhopadhyay, 2013) describen un sistema de monitorización ambiental que utiliza ZigBee para comunicarse entre los nodos y una puerta de enlace IPV6 que transmite los datos a un servidor de Internet, desplegando los datos relevantes; Ali *et al.* (Ali, Soe and Weller, 2015) que implementan una red de monitorización de partículas para medir la calidad del aire en ambientes urbanos que utiliza nodos ZigBee energizados por paneles solares; o Aburukba *et al.* (Aburukba *et al.*, 2016b) quienes proponen una infraestructura de casas inteligentes para personas con necesidades especiales capaz de manejar e interactuar con distintos dispositivos en el hogar, además de que presentan un prototipo de éste con dos sensores, dos actuadores y un control maestro. Por otro lado, para intentar incrementar el rango de este protocolo, se ha buscado realizar redes híbridas con protocolos WAN (Anupriya K *et al.*, 2016). A pesar de su popularidad, al igual que con muchos otros protocolos, las redes ZigBee presentan el inconveniente de requerir una infraestructura de red propia para su implementación, la cual es poco común en entornos domésticos o en entornos urbanos, debido a que es un protocolo utilizado fundamentalmente en redes de sensores.

Una tecnología que no sufre de esta desventaja es WiFi, la cual es fácilmente encontrada en prácticamente cualquier entorno (hogares, oficinas, ciudades, etc.) debido a su uso masivo para acceso al Internet. El nombre de WiFi aparece por primera vez en la historia en el año 2000, cuando la WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*) e Interbrand buscaron un nombre más atractivo para la tecnología que estaban desarrollando; posteriormente la WECA cambiaría su nombre a WiFi Alliance. Hoy en día el concepto de WiFi se utiliza comúnmente para referirse a un tipo de tecnología de LAN inalámbrico que engloba un conjunto de protocolos y tecnologías basados en el estándar IEEE 802.11 (IEEE Standards Associations, 2018; WiFi Alliance, 2019). Este conjunto de protocolos es probablemente la tecnología de comunicaciones inalámbrica más difundida a nivel global, logrando romper las fronteras físicas del mundo para difundir todo tipo de información. Desde sus inicios, los protocolos WiFi se han caracterizados por su alta velocidad de transmisión de datos y capacidad de transmisión de grandes volúmenes de datos. Los protocolos modernos de WiFi son capaces de transmitir a velocidades de datos desde 11 Mbps hasta 1.73 Gbps y utilizan las frecuencias de transmisión de 2.4 GHz o 5

GHz para lograrlo. Debido a su naturaleza, los protocolos WiFi tienden a tener un consumo energético más elevado que las tecnologías orientadas a WSN. Por este motivo, WiFi se suele utilizar como un protocolo auxiliar en aplicaciones IoT, realizando la función de nexo entre la información del mundo físico e Internet. Trabajos de este tipo se ven representados en la literatura por sistemas como el de Adame *et al.* (Adame *et al.*, 2018) que desarrollaron una red híbrida para la monitorización de pacientes para hospitales, utilizando brazaletes RFID, una red ZigBee y una puerta de enlace WiFi para subir los datos a la nube; o el trabajo de Gehlot *et al.* (Gehlot *et al.*, 2016) quienes implementaron una red ZigBee de monitorización de farolas públicas, la cual enviaba los datos de estado de las farolas a la nube con WiFi.

A pesar del uso cotidiano que se le da a los protocolos WiFi en las WSN, también es posible encontrar algunos casos de aplicación donde estos protocolos son utilizados de manera independiente. Por ejemplo, las implementaciones de Yang *et al.* (Yang *et al.*, 2015) quienes proponen una plataforma hardware para la detección de monóxido de carbono en la industria, con una red WiFi que transmite alertas de riesgo de incendio a ordenadores o dispositivos móviles; y Cao-hoang y Duy (Cao-hoang and Duy, 2017) que implementaron una red de nodos WiFi para la monitorización de temperatura, humedad, luminosidad y presión en campos agrícolas.

En entornos urbanos, destacan el trabajo de Hlaing *et al.* (Hlaing *et al.*, 2017) quienes implementaron nodos WiFi capaces de medir el consumo de energía en el hogar y desplegar esta información en una interfaz web; Nguyen y Le-trung (Nguyen and Le-Trung, 2014) que proponen el uso de un *mote* WiFi de bajo consumo para monitorización de variables y dispositivos en edificios inteligentes; o Bhatt y Patoliya (Bhatt and Patoliya, 2016), quienes implementaron nodos WiFi con sensores y actuadores para la automatización de diversos electrodomésticos, utilizando como *middleware* una Raspberry Pi (Raspberry Pi, 2019) la cual envía los datos capturados a una interfaz de usuario para la toma de acciones necesarias.

3.2.2 Energy harvesting para WSN

Anteriormente se realizó una descripción general de las tecnologías de *energy harvesting* y se mostró la diferencia en generación de potencia que existe entre distintas fuentes de energía (Tabla 1). Bajo el contexto de WSN, en la literatura es posible encontrar diversas implementaciones que utilizan de fuentes de *harvesting*, tales como el trabajo de Kong *et al.* (Kong *et al.*, 2016) quienes se enfocan en el desarrollo de WSN con nodos sensores capaces de extraer energía de múltiples fuentes de RF como enrutadores WiFi, teléfonos móviles y torres de TV; o Zeng *et al.* (Zeng *et al.*, 2016) que proponen un nodo de *harvesting* RF con una etapa de rectificación reconfigurable para adaptarse a variaciones en la potencia de la señal captada. En el ámbito de energía solar, destacan las propuestas de Simbeye (Simbeye, 2018) quien diseñó una etapa de *energy harvesting* solar con

algoritmos de MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) para nodos sensores de calidad del agua y oxígeno en campos de acuicultura; Fadhlullah e Ismail (Fadhlullah and Ismail, 2015) quienes proponen un bloque de *harvesting* solar para WSN con voltajes de operación bajos; y Wang *et al.* (C. Wang *et al.*, 2018) que implementaron una red de sensores híbrida, donde parte de los nodos contaban con paneles solares y los demás utilizaban *harvesting* de RF en una plaza comercial. Otros trabajos a destacar son el de Srbinovski *et al.* (Srbinovski *et al.*, 2016) que implementan un nodo sensor con algoritmos de muestreo adaptable y una etapa de *harvesting* eólico; Verma y Sharma (Verma and Sharma, 2018) quienes presentan un módulo *energy harvesting* termoeléctrico con una etapa de procesamiento inteligente para el máximo aprovechamiento de la energía en WSN; o Gaglione *et al.* (Gaglione *et al.*, 2018) que implementaron un serie de nodos sensores que transformaba las vibraciones de un puente en energía para los dispositivos de la red.

En el contexto de viviendas, tal como es el caso que se presenta en este capítulo, las fuentes de *energy harvesting* se ven limitadas principalmente a fuentes solares, térmicas o de RF, debido al tipo de energía que se encuentra comúnmente en estos escenarios. Los generadores de RF, como los enrutadores WiFi y teléfonos móviles, ofrecen una fuente constante de energía en las viviendas, pero presentan una densidad de generación notablemente menor que las otras alternativas. Por otro lado, las fuentes solares en interiores tienden a tener una mayor densidad de potencia por cm² que las otras opciones (Tabla 1); sin embargo, la ubicación física de los nodos sensores juega un rol importante en este tipo de *harvesting*, puesto que requiere de la incidencia lumínica directa. De estas tres fuentes de *energy harvesting* mencionadas anteriormente, la térmica se encuentra en un punto medio de densidad de potencia entre la solar y RF, además de que cuenta con diversas posibles fuentes de generación dentro de la vivienda, tales como frigoríficos, estufas, tubería de agua caliente o sistemas de calefacción. Dado que se busca monitorizar el comportamiento de estos últimos, el uso de *energy harvesting* térmico resulta altamente viable puesto que se cuenta con una fuente de generación considerable y estable en los radiadores del sistema de calefacción.

Dentro del *energy harvesting* térmico existen dos técnicas de captación, el termoeléctrico y el piroeléctrico; el primero se basa en el efecto Seebeck, donde se genera un voltaje a partir de una diferencia de temperatura entre dos semiconductores distintos (Rowe, 1999), y el segundo en la generación a partir de variaciones temperatura (caliente a frío y viceversa) en ciertos elementos, como minerales y polímeros, en un periodo de tiempo (Lang, 2005). Ambas técnicas resultan válidas teniendo fuentes de generación como los sistemas de CC, sin embargo, dado que las variaciones térmicas son en periodos de tiempo muy prolongados, resulta más efectivo el efecto termoeléctrico. Un elemento utilizado como generador termoeléctrico (TEG) en *energy harvesting* son las celdas Peltier, nombradas así por el científico francés Jean Peltier quien descubrió el fenómeno inverso al efecto Seebeck, es decir la generación de una diferencia de temperatura entre dos

semiconductores al aplicársele un voltaje. Las celdas Peltier en sí son un conjunto de uno o más pares de semiconductores PN unidos por dos placas cerámicas, una placa conocida como el lado frío puesto que absorbe el calor y la otra como el lado caliente ya que es la que disipa el calor absorbido, además de un terminal positivo y negativo (Figura 6).

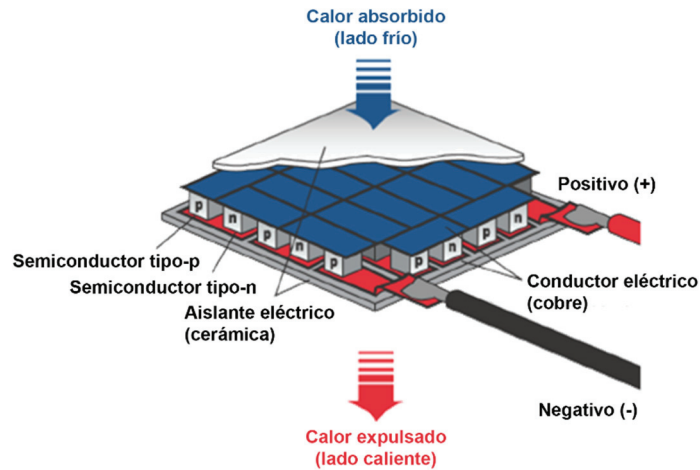


Figura 6 – Componentes que integran una celda Peltier.

Como se describió anteriormente, el factor principal para la generación energética es la diferencia térmica entre sus placas, por lo que incrementar esa diferencia maximizará la eficiencia de conversión del dispositivo. El método más simple para lograr esto es incrementando la disipación de calor, ya sea con elementos pasivos como disipadores metálicos o con dispositivos activos como ventiladores y sistemas refrigerantes. Otro factor importante en las celdas Peltier es el tamaño de su superficie la cual, a manera general, define su capacidad máxima de generación energética por grado de diferencia térmica entre sus placas, puesto que a mayor superficie mayor será el número de pares semiconductores PN que contenga.

Al momento del estudio, este tipo de implementaciones con generadores termoeléctricos no eran tan comunes, dado que por lo general se optaba por soluciones que utilizan otras fuentes de energía alternativa o baterías directamente. Sin embargo, en la literatura existen algunos estudios de *energy harvesting* termoeléctrico que caben destacar, como el trabajo de Lhermet *et al.* (Lhermet *et al.*, 2007) quienes presentan una etapa híbrida capaz de captar energía de fuentes de RF y térmicas para almacenarla en una microbatería; la propuesta de Desai *et al.* (Desai, Ramadass and Chandrakasan, 2014) que implementan una etapa de conversión energética bipolar, capaz de inicializar con voltajes de ± 40 mV y continuar funcionando con voltajes de ± 30 mV, lo cual resulta benéfico en condiciones con poca diferencia térmica; o la implementación de Wang *et al.* (Wang *et al.*, 2013) quienes desarrollaron y probaron una WSN con nodos sensores Tyndall para el control energético en edificios, ya sea comerciales o residenciales, donde utilizan un bloque de *energy harvesting* térmico en tres etapas con una celda Peltier para energizar cada nodo.

3.3 Propuesta de sistema

Buscando proporcionar una solución a las necesidades de monitorización energética presentadas anteriormente, en el presente capítulo se propone la realización de un nodo sensor WiFi autónomo energéticamente, capaz de analizar el funcionamiento de sistemas de calefacción centralizados. El uso de este protocolo de comunicaciones permitirá tener un enlace directo a servidores de datos remotos y un fácil acceso a la información por parte del usuario final. Además, el sistema se diferenciará de otras implementaciones WiFi debido al uso de fuentes de *energy harvesting* para energizar el nodo, buscando evitar el uso de baterías como fuente de alimentación principal. Se optó por este tipo de tecnología de fuente de alimentación para validar la viabilidad de un dispositivo autónomo, aún con una alta demanda de energía, como lo es el caso de un sensor WiFi. Con esto se busca brindar un dispositivo de fácil implementación y bajo mantenimiento (Figura 7).

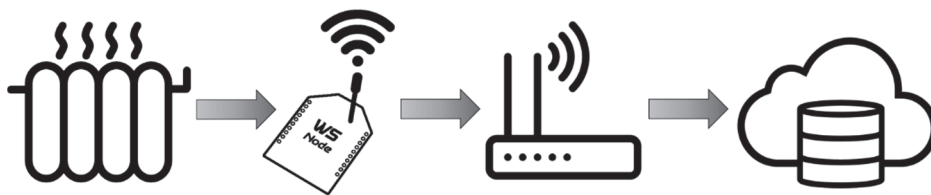


Figura 7 – Propuesta de sistema para monitorización en viviendas.

Dado que el concepto de WiFi engloba todas las tecnologías inalámbricas bajo el estándar 802.11, como primer paso se buscó seleccionar una sola tecnología para el nodo autónomo. Como se mencionó anteriormente, WiFi no fue diseñado pensando en dispositivos de bajo consumo energético. Sin embargo, los *transceivers* WiFi actuales presentan distintos modos de operación de bajo consumo como hibernar, dormir o *idle* y tiempos de transición entre modos más eficientes, lo que permite operar por periodos extendidos de tiempo.

Dentro de las opciones contempladas al momento del estudio, se analizaron los estándares 802.11g, 802.11n y 802.11b, los cuales eran los estándares de mayor uso. El 802.11g y 802.11n son los estándares más recientes de los tres y presentan una modalidad llamada *Power Save* (PS) donde un punto de acceso de la red almacena los datos destinados a un nodo dado y los entrega en intervalos de tiempos específicos, lo cual permite al nodo permanecer en modos de bajo consumo un mayor tiempo. Puesto que la modalidad PS involucra tanto a los nodos como a los puntos de acceso, es necesario configurar todos los dispositivos de esta manera, puesto que no es un comportamiento usual o de fábrica en este tipo de dispositivos. El estándar 802.11b es el protocolo menos utilizado de los tres,

puesto que presenta una velocidad de transmisión mucho menor de 11 Mbps (802.11g = 54 Mbps, 802.11n = 450 Mbps), además de que no presenta la modalidad de PS. Sin embargo, los transmisores con este estándar tienden a tener consumos de corriente mucho menor a los de las otras tecnologías. Comparativamente, en transmisión presenta una demanda de corriente de 154 mA, comparado a 240/246 mA en dispositivos 802.11g/n, lo cual representa aproximadamente un 35% de reducción sobre estos. Debido a que el volumen de datos que se maneja en WSN es bajo, comparado a otras aplicaciones inalámbricas, la velocidad de transmisión no resulta un factor relevante para la selección del protocolo en este caso; sin embargo, el consumo de corriente resulta crítico para cualquier aplicación de bajo consumo energético. La modalidad PS presentada en los estándares 802.11g/n podría resultar útil para aplicaciones WSN, aunque es posible reemplazar esta funcionalidad con una periodicidad de transmisión de datos en intervalos de tiempos previamente definidos, lo cual a su vez permite reducir el proceso de instalación y configuración de un nodo dado. Con esta lógica en mente, se seleccionó el estándar 802.11b para las pruebas de este estudio.

Habiendo descrito de manera general el sistema que se busca implementar, en las siguientes secciones se abordará con mayor detalle los distintos componentes del sistema y etapas de desarrollo realizadas, como se detalla a continuación:

- 1) Se realizará una descripción de los componentes principales de la arquitectura central del nodo, es decir el microcontrolador y el *transceiver*, tanto de la perspectiva de *hardware* como de *firmware*. Posteriormente se realizará una caracterización energética de ambos, con lo que se tendrá un mejor entendimiento de la demanda que será requerida por parte del bloque de *energy harvesting*.
- 2) Se definirá la arquitectura electrónica a utilizar para el bloque de *energy harvesting*. Tras la selección de los dispositivos necesarios, se realizará una caracterización completa de los componentes principales del bloque de *energy harvesting*, buscando comprobar su compatibilidad energética con la arquitectura central del nodo.
- 3) Definidos y validados todos los componentes del nodo, se efectuarán pruebas de funcionamiento del nodo en un entorno de aplicación real, donde se mostrará el comportamiento del mismo en distintos periodos de operación. Los resultados de estos ensayos mostrarán la efectividad de la propuesta, en comparación a aplicaciones similares, y ayudarán a identificar posibles mejoras para el sistema.

3.4 Arquitectura central del nodo

3.4.1 Descripción de la arquitectura

La arquitectura central del nodo sensor se ha basado en un módulo de hardware libre llamado Flyport WiFi (OpenPicus, 2019), con el fin de promover el uso de este tipo de filosofía de trabajo y utilizar análisis previamente realizados (Trasvina-Moreno *et al.*, 2014). Este módulo está compuesto por un microcontrolador (MCU) PIC24FJ256GA106 (Microchip, 2019c), el cual se usó como unidad central de procesamiento, y un *transceiver* (RM) de WiFi MRF24WB0MA (Microchip, 2019a) encargado de las comunicaciones inalámbricas del nodo. Ambos integrados presentan características de bajo consumo energético y múltiples modos de operación, aportando al Flyport un consumo reducido. Sin embargo, se decidió ir más allá de las capacidades del mismo para lograr niveles energéticos más bajos. Además de eliminar circuitería accesoría (LEDs, zeners, LDOs), el diseño original fue modificado para incluir dos niveles de alimentación, uno de 2.2 V para el microcontrolador y otro de 3.3 V para el *transceiver*. También se agregó un circuito MOSFET de conmutación para poder habilitar o deshabilitar el *transceiver* WiFi bajo demanda, a través de una señal del mismo microcontrolador. Este circuito tiene dos funcionalidades principales: la primera es la de poder realizar un arranque inicial en etapas, inicializando el MCU y sus periféricos relevantes y posteriormente el módulo WiFi; la segunda es poder tener un mayor control sobre el *transceiver* en situaciones de poca disponibilidad energética. El sensor de temperatura que se utilizó fue un LMT85 capaz de operar con voltajes de 1.8 V hasta 6 V con una demanda de corriente de 9 μ A, con lo cual puede ser energizado por cualquier salida digital del microcontrolador sin necesidad de circuitería adicional (Anexo I).

Más allá de las modificaciones de hardware realizadas, se personalizó el firmware que utiliza el Flyport WiFi. Por defecto, este dispositivo cuenta con un sistema operativo en tiempo real llamado FreeRTOS (FreeRTOS, 2019) el cual se utiliza principalmente para el manejo del stack de WiFi, periféricos del microcontrolador y otras tareas intrínsecas al funcionamiento del módulo. FreeRTOS se conservó para el manejo de las comunicaciones WiFi, sin embargo, buscando reducir el consumo energético, se modificó la inicialización del dispositivo y el manejo de periféricos. Como se mencionaba anteriormente, en el arranque inicial solo el microcontrolador es energizado, utilizando el oscilador RC interno de 31 kHz (LPRC) en vez del oscilador externo de 32 MHz. De esta forma se logró reducir la energía utilizada en el arranque penalizando, por contra, al tiempo de inicio. Además, todos los periféricos no utilizados dentro del ciclo de operación, como relojes internos, UARTs, el módulo SPI secundario, etc., fueron deshabilitados para evitar pérdidas de energía innecesarias. El periférico del ADC de 16 bits se codificó para habilitarse solo cuando el nodo requiere hacer una medición con algún sensor y, posteriormente, se inhabilita por

completo. El sensor externo de temperatura se controla directamente desde el microcontrolador, a través de un puerto digital I/O con el cual se habilita o deshabilita bajo demanda. Para el uso apropiado del módulo WiFi, el microcontrolador realiza el cambio del oscilador interno LPRC al externo de alta velocidad, ya que es vital para la comunicación con el transmisor y el uso del FreeRTOS. El funcionamiento de este dispositivo, de forma general, se puede observar en el diagrama de la Figura 8.

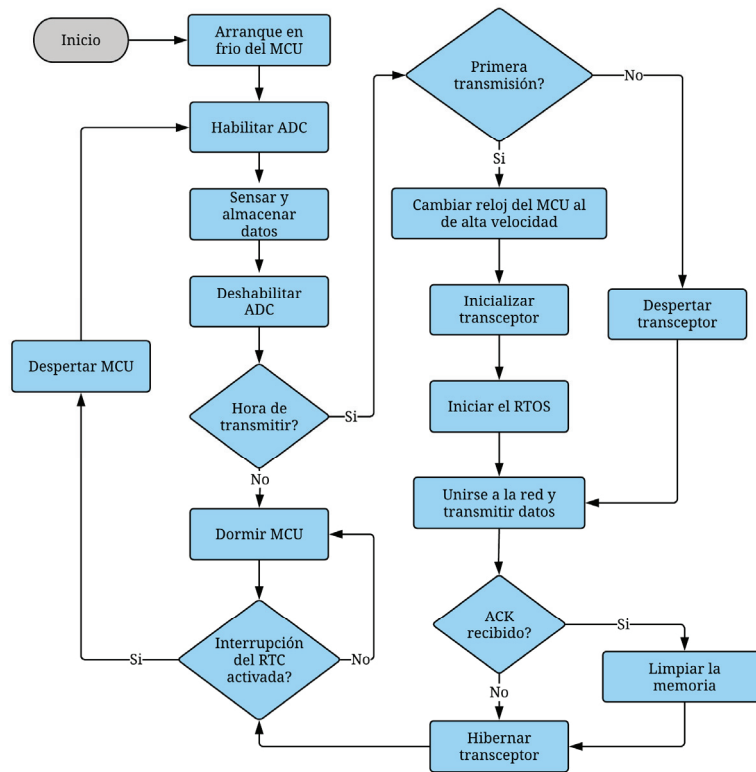


Figura 8 – Diagrama de flujo de operación del nodo sensor WiFi.

Habiendo descrito la arquitectura principal del nodo, se procedió a realizar un análisis de consumo energético de los dispositivos principales. El fin de este estudio es el de tener un mayor entendimiento sobre el comportamiento de ambos dispositivos y conocer los requerimientos energéticos del nodo, lo cual permitirá validar el uso de fuentes de alimentación con *energy harvesting* y, en su caso, determinar que opciones pueden ser viables.

3.4.2 Caracterización energética del nodo.

En estudios previos (Trasvina-Moreno *et al.*, 2014), se realizó un análisis teórico del consumo energético del nodo sensor, con lo que se logró tener un entendimiento de los niveles energéticos del microcontrolador y *transceiver*, los dispositivos de mayor consumo en el nodo. Sin embargo, para conocer realmente su gasto energético, es necesario realizar una serie de mediciones y cálculos, específicamente voltaje, corriente y tiempo. Para

realizar estas mediciones, fue necesario utilizar equipo de laboratorio de la mayor precisión disponible y software para realizar *data logging*. En este caso un:

- Osciloscopio Tektronix MSO 2014 (Tektronix, 2019b).
- Polímetro digital Tektronix DMM4050 (Tektronix, 2019a).
- LabView National Instruments (National Instruments, 2019a).

Este equipo se utilizó para medir los modos activos (sensado, transmisión, procesamiento, etc.) e inactivos (*sleep*) de estos dos integrados de manera independiente, lo cual se logró conectando el equipo de medición a un ordenador a través de un puerto serie y utilizando una interfaz hecha a medida con LabView para la captura y análisis de datos. Es importante notar que para las transmisiones WiFi se utilizó el protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*) en vez de UDP (*User Datagram Protocol*), puesto que se busca tener mayor seguridad en el enlace de datos y garantizar la recepción de los mismos.

Para medir los estados activos de los integrados, se colocó un resistor de $1\ \Omega$ entre la fuente de alimentación y cada dispositivo, es decir en el *high-side*, el cual se midió con un osciloscopio para poder extraer el área bajo la curva de estos modos de operación (Figura 9 y Figura 10). Estas mediciones fueron realizadas múltiples veces para extraer valores promedios.

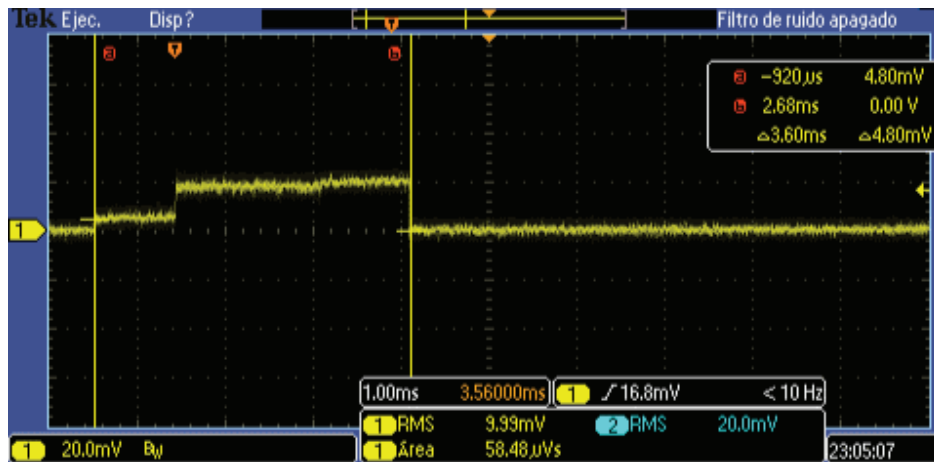


Figura 9 – Carga consumida por el microcontrolador al realizar un sensado de datos. Escala vertical de 20 mV/dv y escala horizontal de 1 ms/div.

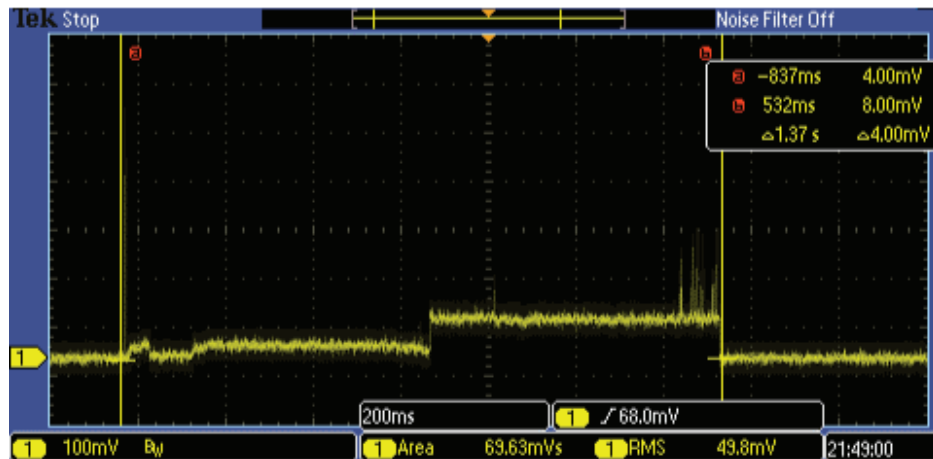


Figura 10 – Carga consumida por el transceiver WiFi al realizar una transmisión de datos. El nivel de la señal de bajo por debajo del "cero" para evitar perder la carga de los picos y que se alterarán los valores medidos. Escala vertical de 100 mV/div y escala horizontal de 200 ms/div.

En la etapa de transmisión del microcontrolador, la corriente consumida por el dispositivo es un consumo lineal de 20 mA por el mismo periodo de tiempo que permanece activo el *transceiver* (Figura 10), por esta razón no se mostró la figura obtenida con el osciloscopio. Para cada etapa activa de ambos dispositivos se realizaron múltiples mediciones para así poder calcular la carga promedio de cada una de las modalidades de trabajo y, dado que se utilizó un resistor con valor de 1Ω , es posible realizar el cálculo para extraer la carga en cada etapa. Para las etapas "inactivas" o de bajo consumo, se realizaron mediciones de corriente directa con el multímetro digital, enlazando éste al PC por medio de puerto serie y utilizando una interfaz en LabView para calcular la carga promedio total. Después de extraer los datos anteriores, estos fueron convertidos a unidades de energía para poder tener una sola unidad de medida comparable entre todos los dispositivos (Tabla 2).

Tabla 2 – Consumo energético promedio de los dispositivos principales del nodo en sus modos activos e inactivos.

Estado	Microcontrolador	Transceiver
Sensando	146.3 μ J	N/A
Transmitiendo	69.93 mJ	240.2 mJ
Inactivo	24.2 μ J	1.65 μ J

En la Tabla 2 se muestran los tres estados principales de ambos dispositivos, nombrados por la actividad principal que se realiza, y el consumo energético que presentan. Cabe notar que el estado de "inactivo" representa cualquier modo de bajo consumo (*sleep*, hibernación, etc.) y que en "sensando" la energía del *transceiver* no fue medida puesto que el dispositivo no participa en esta actividad. Para determinar la energía consumida por estos dispositivos, se utilizó un método similar al propuesto en el análisis teórico previo (Trasvina-Moreno *et al.*, 2014):

$$E_{CICLO} = E_{MCU_{Sens}} + E_{MCU_{Tx}} + E_{MCU_{Inact}} + E_{RM_{Tx}} + E_{RM_{Inact}} \quad (1)$$

La Fórmula (1) muestra cómo se extrae la energía en cada ciclo para la arquitectura central, donde *E* significa energía, *MCU* microcontrolador, *RM transceiver*, *Tx* transmitiendo, *Sens* sensando e *Inact* a inactivo. Cabe notar que en esta fórmula no se incluye la energía de arranque del MCU y RM, puesto que este no es un proceso repetitivo en cada ciclo. Para poder calcular la energía de un ciclo, es necesario establecer un escenario de operación que defina la periodicidad de las actividades. Con base a los resultados obtenidos en el estudio teórico (Trasvina-Moreno *et al.*, 2014), se realizó una selección de los escenarios de mayor viabilidad para ser utilizados como punto de referencia, donde estos tienen como común denominador que las transmisiones serían realizadas cada hora y solo habría variaciones en la periodicidad en el sensado de datos. Habiendo definido la fórmula de energía por ciclo, seleccionado los ciclos de operación y extraído las medidas de la arquitectura principal (Tabla 2), fue posible realizar el cálculo de la energía por ciclo para cada estado (Tabla 3).

Tabla 3 – Energía consumida por la arquitectura central en cada estado

Periodo de ciclo de 1 hora						
Ciclo de operación		MCU		RM		Arquitectura central
Medidas por ciclo	Transmisiones por ciclo	Energía en estados activos (mJ)	Energía en estados inactivos (mJ)	Energía en estados activos (mJ)	Energía en estados inactivos (mJ)	Total
360	1	122.59	87.08	240.2	5.93	455.80
60	1	78.70	87.11	240.2	5.93	411.94
6	1	70.80	87.11	240.2	5.93	404.04
1	1	70.07	87.11	240.2	5.93	403.31

En la Tabla 3 es posible notar que la energía consumida por la arquitectura central es elevada, si se compara con otras implementaciones similares, y esto se debe principalmente al alto consumo de corriente del microcontrolador en su estado de *sleep*, estado en el que se está más de un 90% del tiempo. El *transceiver* de WiFi también tiene un consumo de corriente elevado en su estado activo, si se compara con otros protocolos, sin embargo, este se ve minimizado por su baja periodicidad en cada ciclo.

Habiendo extraído estas estimaciones de energía por ciclo, es posible tener una buena aproximación de la energía que será requerido proveer por una fuente de alimentación, que en este caso se desea ser provista por fuentes de *energy harvesting*. Por este motivo, en la siguiente sección se realizará una evaluación de las posibles fuentes de *energy harvesting*, se seleccionará una opción y se describirá la arquitectura utilizada.

3.5 Bloque de *energy harvesting*

3.5.1 Arquitectura del bloque de *energy harvesting*

Teniendo el trasfondo de éxito de otros estudios, se optó por utilizar una etapa de *energy harvesting* térmico como fuente energética para esta propuesta. Por este motivo, se seleccionó una celda Peltier de 40x40x3.4 mm de European Thermodynamics, la cual está compuesta por 127 pares de semiconductores PN. Debido al rango de temperatura en el que se utilizará la celda (60-80 °C) y los gradientes de temperatura relativamente bajos, su potencia máxima (6.7 W) nunca será alcanzada. Sin embargo, para incrementar la energía a extraer, se le agregó un disipador de calor de 40x40x18 mm y se utilizó una pasta de transferencia térmica para mejorar este factor (Figura 11). Como se mencionó anteriormente, es posible incrementar la disipación con medios activos para aumentar la potencia de salida, sin embargo, estos no fueron considerados puesto que generarían un consumo adicional al sistema que tendría que ser compensado por la misma fuente de *energy harvesting*.

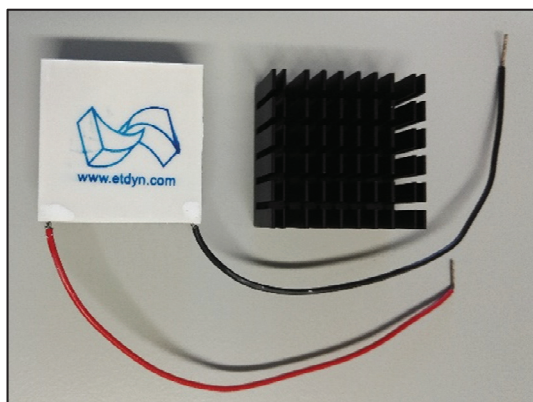


Figura 11 – Celda Peltier y disipador térmico utilizados.

Para poder convertir la energía ambiental captada en magnitudes útiles para la arquitectura central del nodo, se seleccionó el LTC3108 (Analog Devices, 2018) como componente principal para la gestión y distribución de la energía proporcionada por la celda Peltier. Además, el circuito del LTC3108 trabaja como elevador de voltaje y es capaz de almacenar en repositorios externos la energía excedente para futuro uso. Este dispositivo cuenta con una salida estática de 2.2 V (LDO), una salida de voltaje variable fijada a 3.3 V (OUT) y una última salida utilizada para almacenar energía en dispositivos como baterías de litio o supercondensadores (STORE) (Figura 12).

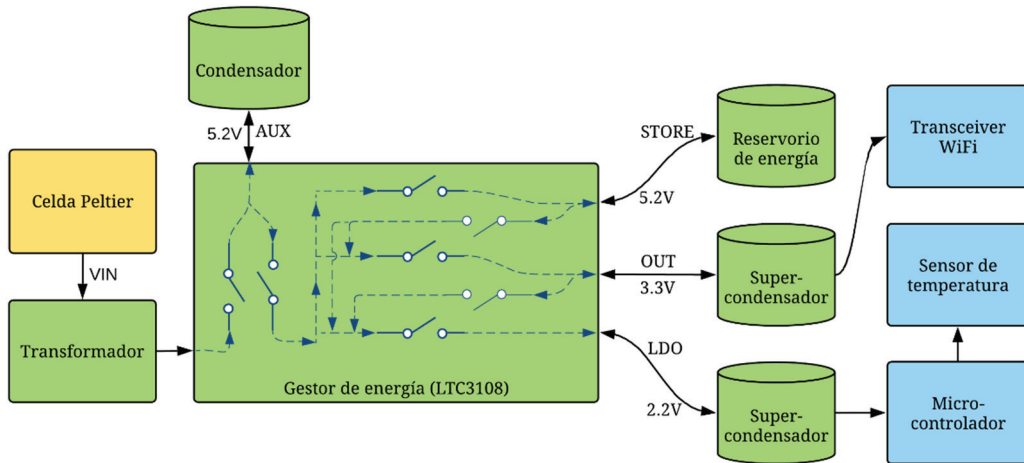


Figura 12 – Diagrama a bloques generalizado del circuito de energy harvesting y su distribución energética a los dispositivos principales del nodo.

Como se muestra en la Figura 12, internamente el LTC3108 distribuye la energía de manera similar a un multiplexor gestionando señales. La entrada principal de energía proviene del transformador que eleva el voltaje que recibe del TEG (VIN). Este voltaje es recibido por un condensador auxiliar (AUX) que actúa como línea de distribución de la entrada del LTC3108 y que provee energía a las salidas LDO, OUT y STORE en ese orden, siempre y cuando el circuito no se encuentra conectado a ningún dispositivo, es decir sin carga. Una vez que una de las salidas llega a su nivel de voltaje nominal, esta desborda en la salida siguiente y así de forma consecutiva (Figura 13).

Cuando el circuito de gestión energética se encuentra conectado a una carga, como la arquitectura central del nodo, su comportamiento es menos lineal que lo antes descrito. Si en algún punto la salida LDO comienza a demandar más energía que la acumulada en su condensador, este tomará energía de cualquiera de los condensadores de STORE, OUT o AUX, en ese orden de prioridad. En el caso de la salida OUT, si esta requiriera más energía de la almacenada, solo podría tomar de lo almacenado en los condensadores de STORE o AUX. Como se puede notar la salida de LDO presenta una mayor jerarquía con respecto a OUT y las demás salidas, pudiéndose entender como la salida de voltaje principal, por lo que LDO nunca proveerá energía a ninguna otra salida en caso de necesitarlo. Es importante mencionar que, debido a su función, la salida STORE solo se activará en situaciones donde existe un exceso de energía generada; sin embargo, si la carga en LDO y OUT consumen constantemente la energía provista, STORE permanece inactiva.

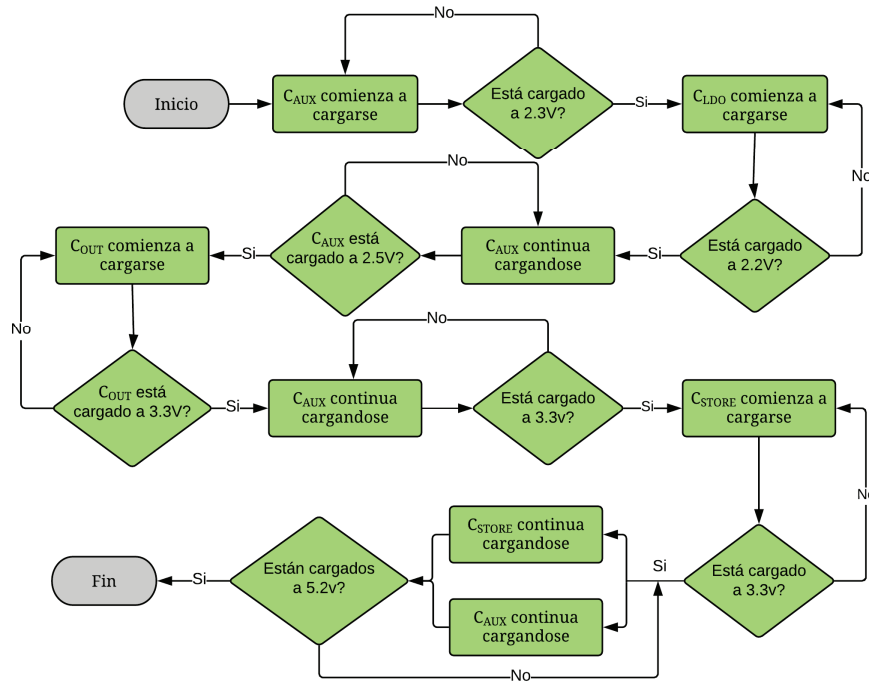


Figura 13 – Diagrama de flujo del comportamiento del gestor de energía LTC3108. C_{AUX} , C_{LDO} , C_{OUT} y C_{STORE} corresponden a los condensadores de las salidas correspondientes.

3.5.2 Caracterización del generador termoelectrico

Habiendo seleccionado y descrito el bloque de *energy harvesting*, el siguiente paso a seguir es la realización de un análisis de las capacidades de generación por parte de la celda Peltier, lo cual permitirá determinar la mejor configuración para el circuito de *harvesting* y así poder maximizar la energía extraída. Para lograr este propósito se realizó un análisis de voltaje, corriente y temperatura de la celda Peltier por un periodo dado de tiempo, colocándola sobre la superficie de un radiador. Para este análisis se utilizó el osciloscopio (MSO2014) y multímetro (DMM4050) para las medidas de potencia, además de un *data logger* para termopares TC-08 de Pico Technology (Pico Technology, 2019) y termopares tipo-K para las mediciones de temperatura (Figura 14).

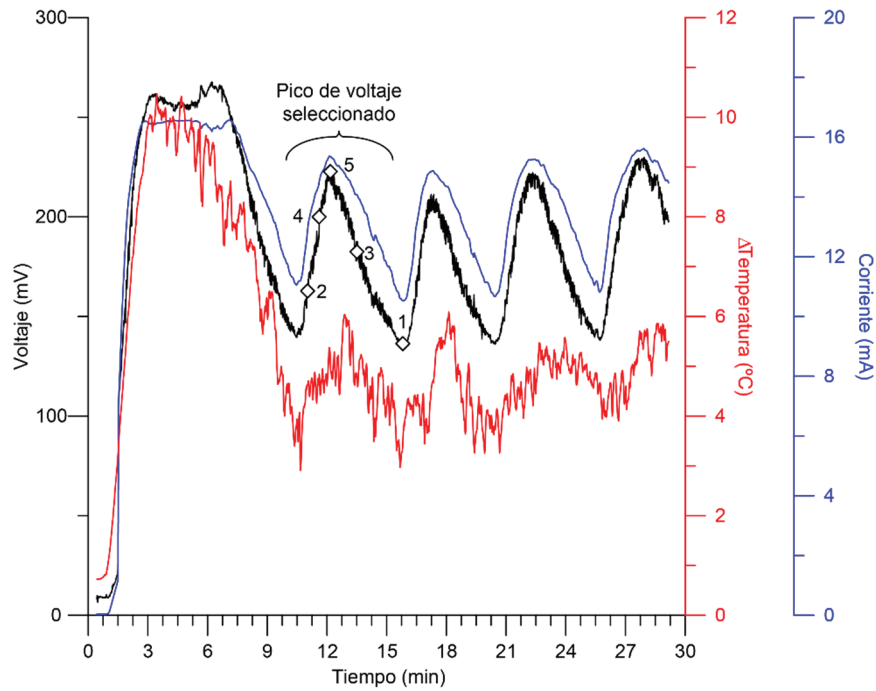


Figura 14 – Caracterización de la celda Peltier donde se comparan voltaje, corriente y diferencia de temperatura entre sus placas caliente y fría. Los puntos de prueba seleccionados se encuentran numerados de acuerdo a su valor incremental de voltaje.

Como se puede notar en la Figura 14, en el arranque inicial de la celda Peltier hay una generación de energía mayor debido a la inicialización del radiador y el arranque en frío de la celda, lo cual provoca un incremento en la diferencia de temperatura entre las placas del TEG. Aunque esto resulta útil para una inicialización más rápida del circuito de *energy harvesting*, este pico inicial no puede ser considerado para la estimación promedio de conversión energética, puesto que representa un periodo que solo ocurrirá cuando el radiador sea encendido. En la fase estable de generación energética, se tiene una diferencia de entre 4-6 °C entre las placas de la celda Peltier con una temperatura máxima de contacto del radiador de 75 °C. Aunque es posible calcular la potencia generada en todo el espectro captado (Figura 14), para simplificar las pruebas posteriores, solo se realizó una selección de valores que representarían las variaciones de operación de la celda Peltier. Debido a esto, se eligieron 5 puntos de voltaje y corriente del segundo pico, el cual representa una fase estable de conversión energética, para así calcular la potencia de entrada en cada uno de estos puntos (Tabla 4).

Tabla 4 – Valores de voltaje seleccionados para pruebas de conversión energética.

Puntos de prueba	Voltaje (mV)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
1	137.24	10.67	1.46
2	160.55	12.85	2.06
3	185.94	14.03	2.60
4	207.02	14.78	3.06
5	224.10	15.35	3.44

Posteriormente, con los valores de la Tabla 4, se procedió a evaluar el transformador, el cual recibe el voltaje del TEG para elevarlo y enviarlo al LTC3108 para su uso. Esta pieza resulta crucial en el funcionamiento del integrado puesto que, como menciona Wang *et al.* (Wang *et al.*, 2013) en su trabajo, afecta directamente a la eficiencia total de la conversión energética. Siguiendo las recomendaciones realizadas en las hojas de especificación del LTC3108, se seleccionaron transformadores de tres valores distintos (T1:100, T1:50 y T1:20) para evaluar la eficiencia del circuito en los puntos de prueba (Tabla 4). Para lograr esto, se utilizó una fuente de alimentación regulable para emular el TEG. Esta se aplicó a cada transformador y, para cada valor de prueba, se midió la potencia en la salida OUT, configurada a 3.3 V, y se calculó la eficiencia entre su entrada y salida (Figura 15).

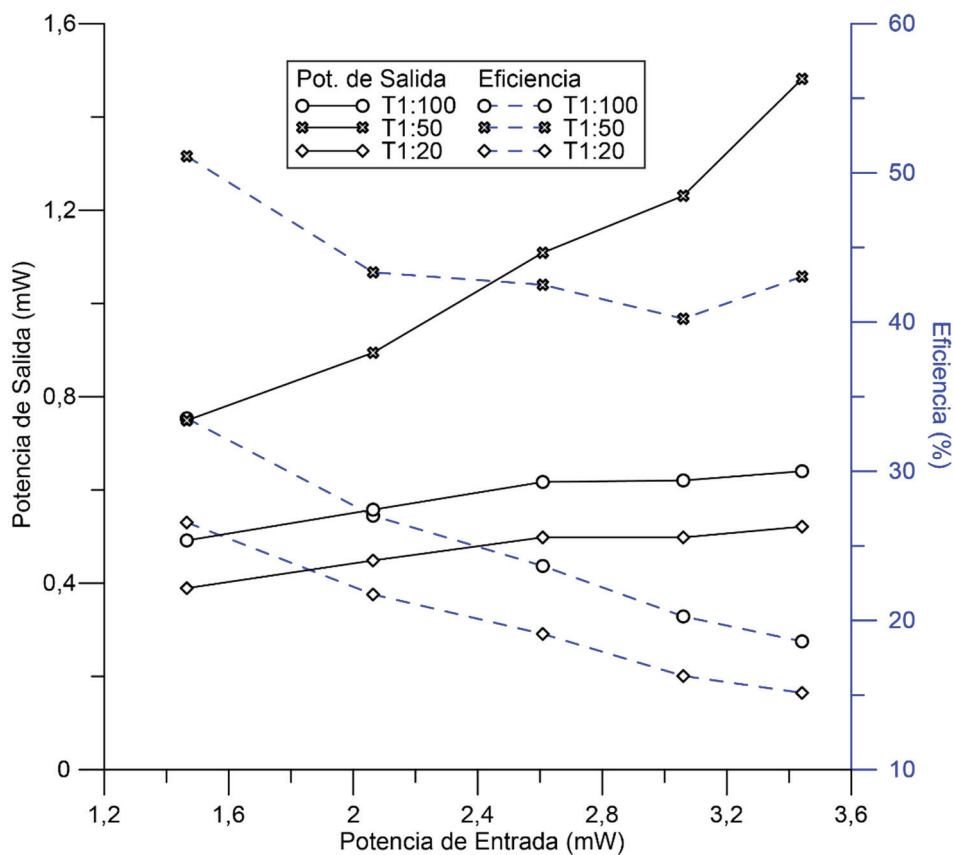


Figura 15 – Eficiencia de los transformadores comparando la salida OUT a 3.3 V y la entrada VIN. La potencia obtenida se muestra con líneas continuas y la eficiencia con líneas punteadas.

Como se ve representado en la Figura 15, de los tres transformadores probados, el T1:50 es el que presenta una mayor eficiencia y potencia de salida con una ventaja notable sobre las otras opciones. Al utilizar este transformador se puede garantizar una producción de energía con una eficiencia superior al 40% en sus fases de generación estables. Sin embargo, el arranque inicial del circuito de *energy harvesting* se verá afectado puesto que, con un transformador T1:50, requiere una entrada mínima de 40 mV por parte del Peltier para el correcto funcionamiento del LTC3108. Aunque es importante intentar aprovechar al

máximo la energía provista por la fuente de energía, en este caso el radiador, es más crítico tener una eficiencia mayor y estable a lo largo de sus intervalos de funcionamiento.

3.5.3 Evaluación del bloque de *energy harvesting*

Con la selección del transformador apropiado para el circuito de *energy harvesting*, se realizaron análisis adicionales con los valores de prueba previamente seleccionados (Tabla 4) para comparar la potencia y eficiencia de las salidas LDO y OUT, con el afán de entender mejor las limitantes de este bloque en el escenario propuesto. Es importante entender que el circuito integrado tiene dos regímenes de funcionamiento: uno para la carga inicial de las salidas LDO/OUT y otro para cuando estas salidas han llegado a su voltaje nominal; por lo que es necesario realizar análisis independientes para cada uno. Para futura referencias estos estados serán denominados como régimen de carga y estable de manera correspondiente. En el análisis de ambos modos de operación se supone un escenario donde no se tiene energía almacenada, ejemplificando así el peor de los escenarios donde la energía generada es igual a la consumida.

El primer análisis que se realizó fue el del el régimen de carga, comparando la potencia de entrada de la celda Peltier y las salidas LDO/OUT (Figura 16).

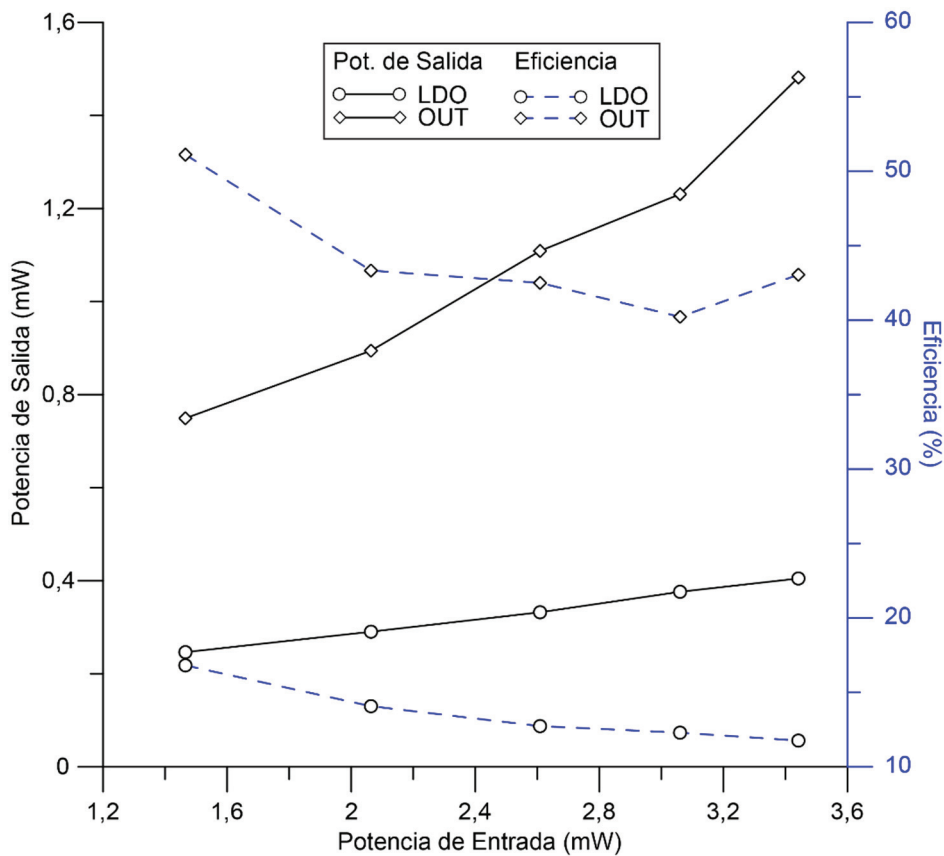


Figura 16 - Comparativa de potencia y eficiencia en el régimen de carga. La potencia obtenida se muestra con líneas continuas y la eficiencia con líneas punteadas.

Como se puede observar, en este régimen la salida LDO presenta una baja eficiencia (10-16%) si se compara con la salida OUT, esto debido a que el condensador AUX tiene un nivel de voltaje bajo (2.3 V) en esta etapa y a la eficiencia interna del LDO embebido dentro del circuito integrado del LTC3108. Por otro lado, en la salida OUT principal se presenta una eficiencia que oscila entre el 40% y 51% que, si se compara con otros trabajos realizados al momento del estudio (Tabla 5), es un resultado bastante favorable.

Tabla 5 – Comparativa del bloque de energy harvesting con otros estudios relevantes (Lhermet *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2013; Desai, Ramadass and Chandrakasan, 2014).

	Desai <i>et al.</i>	Lhermet <i>et al.</i>	Wang <i>et al.</i>	Presente trabajo
V_{IN}	100 mV	1 V	250 mV	185 mV
E_{OUT}	470 μ J	480 μ J	1.02 mJ	1.1 mJ
Eficiencia	68%	35%	25%	44%
V_{OUT}	1.8 – 5.5 V	3.3 V	3.3 V	3.3 V

Conociendo la energía que se genera este bloque en sus dos salidas (LDO/OUT) es posible realizar una estimación del tiempo que tomaría cargar los reservorios energéticos en su etapa de carga inicial, es decir cuando estos no tienen una carga inicial. Cabe notar que para minimizar este tiempo de carga de los reservorios es importante que la arquitectura central, es decir el microcontrolador y *transceiver*, se mantenga inactiva hasta que el bloque de *energy harvesting* se encuentre en régimen estable.

En el régimen estable (Figura 17) del *harvester* su eficiencia y comportamiento se mantiene igual en la salida OUT pero cambia drásticamente en la salida LDO, existiendo dos escenarios de carga distintos para esta salida. En el primer escenario el condensador de OUT se encuentra cargado a su valor nominal (3.3 V) y el condensador de AUX tiene este mismo valor o se encuentra ligeramente por debajo; en esta etapa el condensador de LDO se carga con la misma razón que el condensador OUT, por lo que la salida LDO presenta una mayor eficiencia que en el régimen de carga. En el segundo escenario el condensador AUX presenta una carga mayor que el condensador OUT, teniendo como límite los 5.2 V, lo cual disminuye la eficiencia de la salida LDO debido a que el integrado (LTC3108) internamente limita la corriente drenada al condensador del LDO (Analog Devices, 2018).

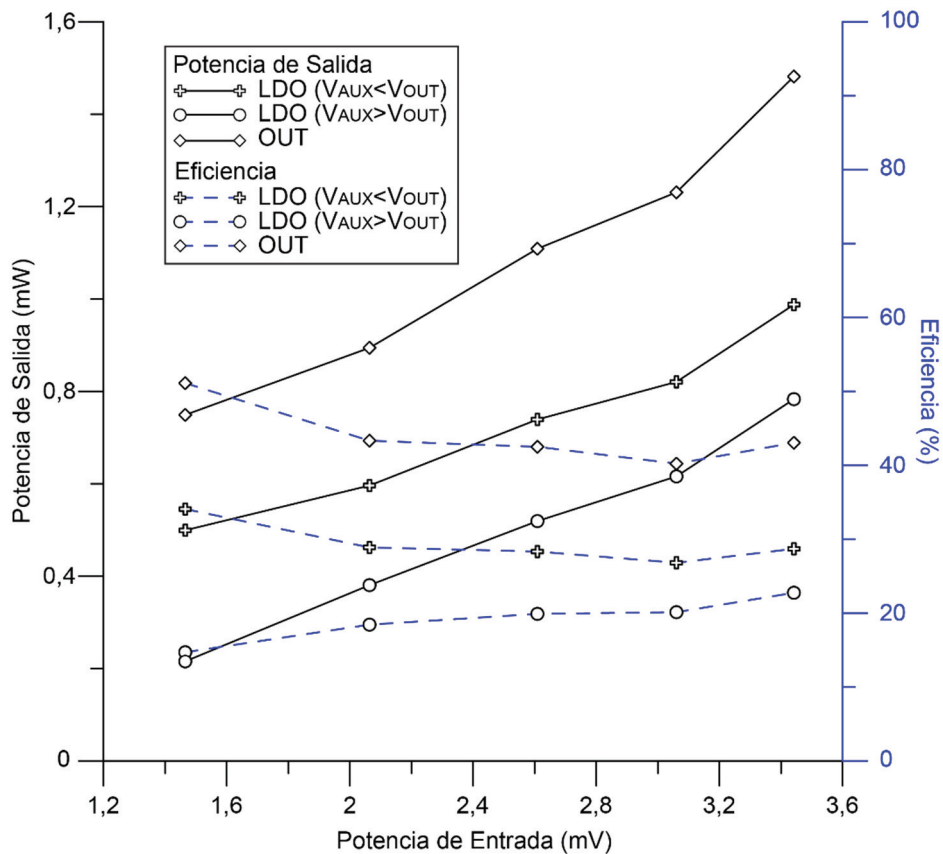


Figura 17 - Comparativa de potencia y eficiencia en el régimen estable. La potencia obtenida se muestra con líneas continuas y la eficiencia con líneas punteadas.

En el peor de los escenarios de carga, es decir cuando $V_{AUX} > V_{OUT}$, en promedio es posible extraer 519 μJ de la salida LDO en el régimen estable y 1.1 mJ de la salida OUT, que si se compara con los resultados de la Tabla 2 es posible apreciar que es posible generar suficiente energía para mantener el MCU y *transceiver* en sus estados inactivos y poder cargar los reservorios de energía correspondientes para sus estados activos.

Como se mencionó anteriormente, estos análisis se realizaron sin el uso de un dispositivo de almacenaje en la salida STORE, puesto que esto cambiaría la razón de carga de los condensadores de salida y es posible que este escenario nunca se presente. No obstante, este escenario también fue analizado y se encontró que con un supercondensador era posible proveer una corriente promedio de 5 mA para cargar los condensadores de las salidas OUT y LDO.

Habiendo analizado la capacidad de generación del *energy harvester* y conociendo los requerimientos de energía de la arquitectura central del nodo (Tabla 3), el siguiente paso a seguir es el de calcular el tamaño de los reservorios de energía de las salidas LDO y OUT, los cuales proveerán energía principalmente en los estados activos de la arquitectura central. Para realizar el cálculo de la capacidad mínima requerida para cada caso, se utilizó la siguiente fórmula:

$$C = \frac{2\varepsilon}{V_2^2 - V_1^2} \quad (2)$$

Donde C es la capacitancia en faradios, ε es la energía estimada en julios, V_1 es el voltaje mínimo tolerado y V_2 es el voltaje nominal. Dependiendo si el cálculo se realiza para el MCU o el *transceiver*, los voltajes utilizados en la fórmula varían de acuerdo a las aportaciones y limitantes de su salida correspondiente del *energy harvester* (Tabla 6).

Tabla 6 – Cálculos realizados para los reservorios de energía de la arquitectura central.

Ciclo de una hora					
Mediciones por ciclo	Transmisiones por ciclo	MCU		Transceiver	
		Energía en estado activo (mJ)	Capacitancia (mF)	Energía en estado activo (mJ)	Capacitancia (mF)
360	1	122.6	291.9	240.2	133.4
60	1	78.72	187.4	240.2	133.4
6	1	70.82	168.6	240.2	133.4
1	1	70.08	166.9	240.2	133.4

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 6, viendo la densidad de energía requerida y el tipo de consumo que a pulsos, se optó por utilizar supercondensadores como reservorios debido a su alta capacidad de almacenamiento y su excelente respuesta a descargas de consumo a pulsos. En la selección de los supercondensadores es importante considerar los picos de corriente a los que pueden enfrentarse, lo cual definirá la resistencia serie equivalente (ESR) interna de estos dispositivos. Si se utiliza el *transceiver* como referencia para ambos reservorios, de acuerdo a su hoja de especificaciones éste llega a tener una corriente máxima de 154 mA, lo cual exige que los supercondensadores tengan una ESR menor a los 20 Ω .

Habiendo calculado todos los componentes adicionales requeridos para el funcionamiento del *energy harvester* en conjunto con la arquitectura central, el siguiente paso a seguir fue el de realizar un análisis temporal de este bloque para la validación del tiempo requerido para la inicialización del nodo. Para poder realizar este análisis es necesario seleccionar un ciclo de operación de los anteriormente mencionados, por lo que se seleccionó el ciclo con 60 mediciones por hora, puesto que este representa un punto intermedio entre todos los ciclos definidos. Teniendo definido el ciclo de operación del nodo y conociendo la energía que se requiere para el MCU y *transceiver* por ciclo, se decidió utilizar 2 supercondensadores de 100 mF y ESR de 4 Ω como reservorio para cada uno de los dispositivos de la arquitectura central. En total el MCU y *transceiver* contarán con 200 mF de almacenaje individual lo cual supera las necesidades definidas en la Tabla 6. Sin embargo, se optó por tener un margen adicional de capacidad para así poder cubrir posibles imprevistos en las pruebas. Por último, la celda Peltier se conectó al bloque de *energy harvesting*, con sus correspondientes supercondensadores en cada salida, y se realizaron

mediciones cada 10 segundos de voltaje en la entrada del *harvester* y en las salidas OUT y LDO (Figura 18).

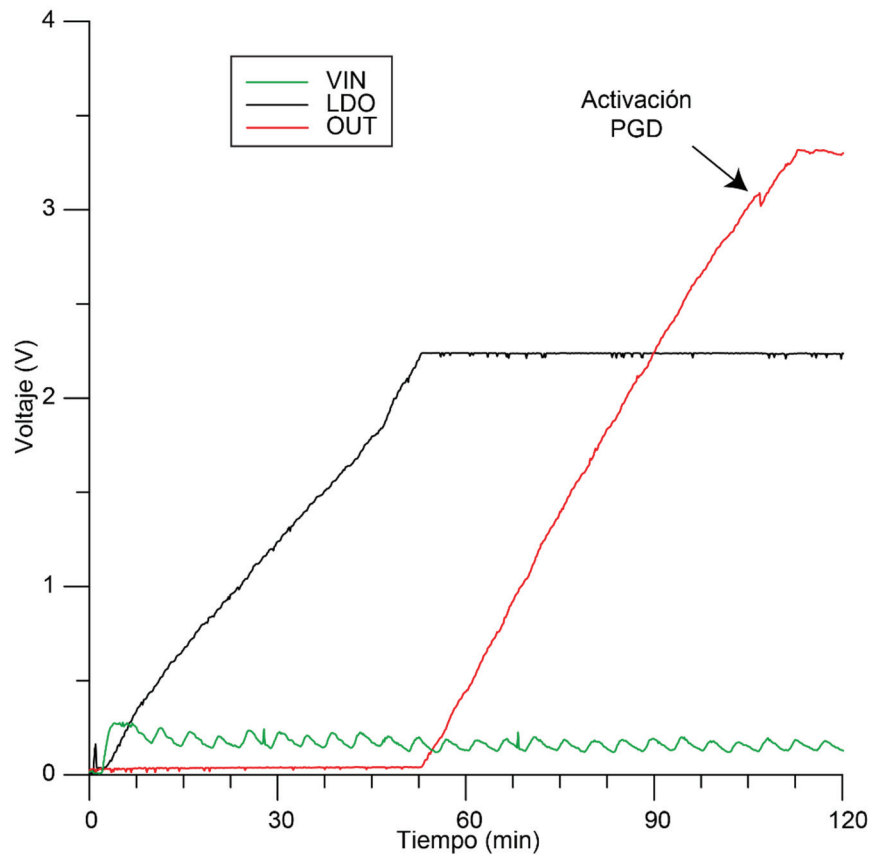


Figura 18 – Tiempo de carga para los supercondensadores de salida y voltaje generado en la entrada en el arranque inicial.

Como se puede apreciar en la Figura 18, en el arranque inicial del *energy harvester* se tarda aproximadamente 50 minutos para que LDO logre su voltaje nominal y 100 minutos para que la señal de PGD se active, con lo cual se indica al microcontrolador que se dispone de suficiente energía para poder alimentar al *transceiver* y es posible iniciar el ciclo de trabajo. Con un tiempo de inicialización de 100 minutos, este escenario podría verse como desfavorable debido a la pérdida de datos en ese periodo de tiempo, sin embargo, este comportamiento de carga solo ocurre en el primer uso del nodo o en situaciones donde los reservorios se hayan descargado por completo. Nótese que el tiempo inicial de carga puede variar dependiendo de la energía generada por el *energy harvester*, por lo que es posible llegar a reducir este tiempo de arranque y que este tiempo también es posible reducirse si se ajustan los supercondensadores a valores lo más cercano al consumo calculado (Tabla 6).

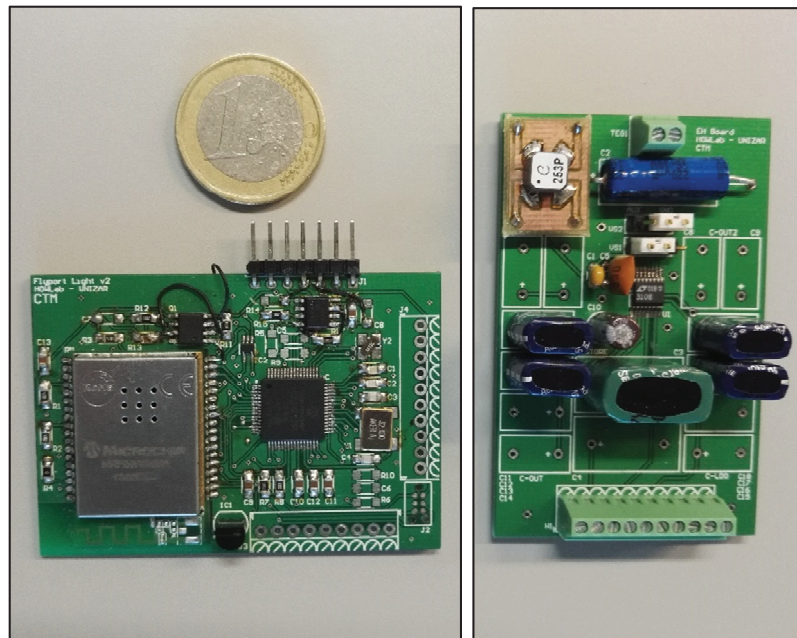
Con los resultados de esta prueba se observa que incrementar el periodo de operación podría tener un alto impacto en el arranque inicial, puesto que esto requiere redimensionar los supercondensadores para poder sostener dicho comportamiento. Debido

a esto, el ciclo de operación de 60 mediciones y 1 transmisión por hora seguirá siendo utilizado para las siguientes pruebas.

3.6 Validación del nodo sensor

3.6.1 Pruebas en el entorno doméstico

Habiendo caracterizado el consumo de la arquitectura central y el bloque de *energy harvesting*, en esta sección se realizará la validación del nodo en conjunto (Figura 19). Para esto se realizarán pruebas en una vivienda por un periodo de 24 horas continuas, buscando comprobar el correcto funcionamiento y desempeño del dispositivo.



(a)

(b)

Figura 19 – Prototipos del nodo sensor, donde (a) es la arquitectura central y (b) el bloque de *energy harvesting*. En ambos casos, los prototipos tienen algunos componentes sin soldar puesto que son para uso futuro.

En las pruebas de validación es importante destacar que existen dos escenarios que deben ser considerados, un periodo de generación energética activo de 8 horas y un periodo inactivo de 16 horas. El periodo activo representa el intervalo diario en que se habilitan las calefacciones centralizadas en edificios, cubriendo un intervalo de tiempo de las 2 PM a las 10 PM, y el periodo inactivo caracteriza el periodo de tiempo donde los radiadores del sistema de calefacción se encuentran apagados. El objetivo de realizar el análisis del nodo en el periodo inactivo es el de cuantificar la descarga de los supercondensadores que

alimentan al MCU y *transceiver* y la cantidad de energía requerida para el reinicio del sistema al día siguiente de operación.

En estas pruebas se utilizó un supercondensador de 470 mF en la salida STORE, además de los supercondensadores de 2x100 mF en LDO y OUT, para poder cuantificar la energía excedente que pudiera ser almacenada, si es que ese escenario se diera. En cada una de estas salidas (STORE, LDO y OUT) y la entrada del bloque de *energy harvesting* (VIN) se realizaron mediciones de voltaje cada 10 segundos (Figura 20), mientras que para verificar el éxito de las transmisiones de datos por WiFi se utilizó el *software* Wireshark (Combs, 2018) para validar la recepción en el servidor de los paquetes TCP.

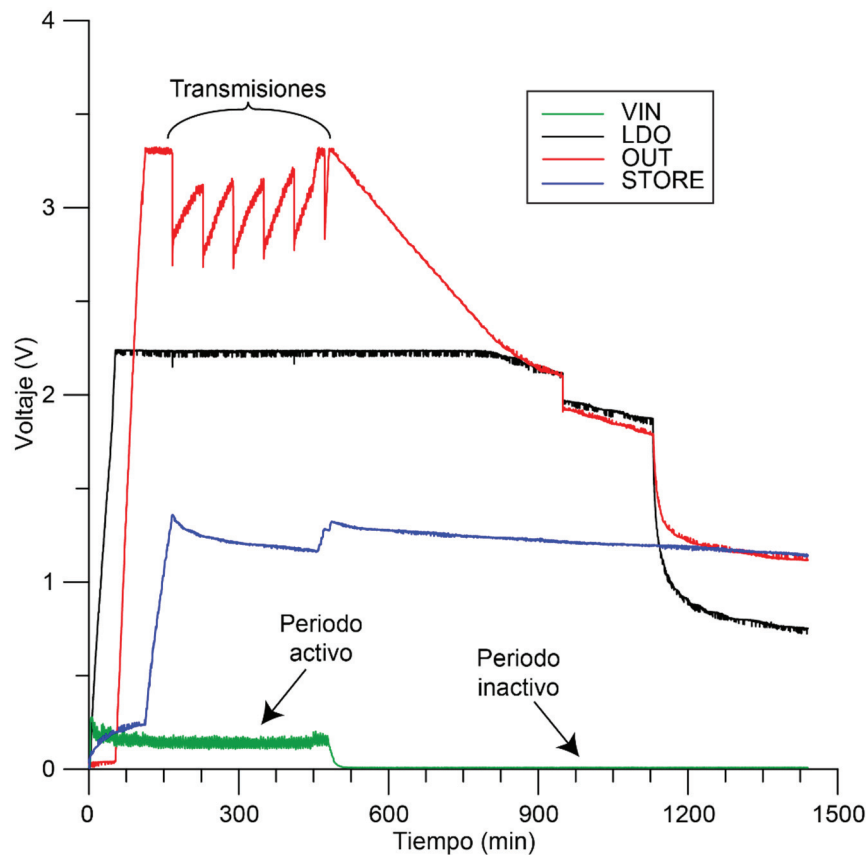


Figura 20 – Prueba de 24 horas en una vivienda para validación del nodo sensor.

En la Figura 20 se pueden apreciar las mediciones realizadas en el periodo de pruebas, donde lo primero que se puede notar son las caídas abruptas de energía en las salidas OUT y LDO, aunque esta última en mucho menor grado, con cada transmisión de datos realizada. Además, se puede observar un comportamiento de recarga del supercondensador OUT mucho más veloz en situaciones donde se cuenta con energía almacenada en el reservorio de STORE, el cual no se logró cargar por completo sin embargo esta energía fue suficiente para auxiliar en el proceso de carga. Otro aspecto a notar es que el voltaje de entrada (VIN) promedio fue de tan solo 148 mV, lo cual se encuentra por debajo de la media de los valores que se contemplaron en las pruebas de caracterización del bloque de *energy harvesting* (Tabla 4), es decir 185 mV, por lo que no se generó la

cantidad de energía que se esperaba y la activación de la señal de PGD llegó hasta el minuto 108. Este comportamiento probablemente está relacionado a la época en la que se realizó esta prueba, ya que en el mes de septiembre la temperatura ambiente es ligeramente cálida de lo esperado y, por ende, el gradiente térmico de la celda Peltier es inferior a lo que se esperaría en invierno.

Debido al tiempo de arranque inicial del nodo, solo 6 transmisiones de datos al servidor WiFi fueron realizadas, de las cuales se tuvo un éxito del 100% sin corrupción de datos, de acuerdo a la información capturada con Wireshark.

Posteriormente, se volvieron a realizar las mismas mediciones que en el ensayo anterior, con la diferencia de que el ensayo se extendió hasta la primera transmisión exitosa del día siguiente. El objetivo de esta prueba es el de emular el comportamiento del nodo sensor y la carga de los supercondensadores en un ciclo de trabajo continuo (Figura 21).

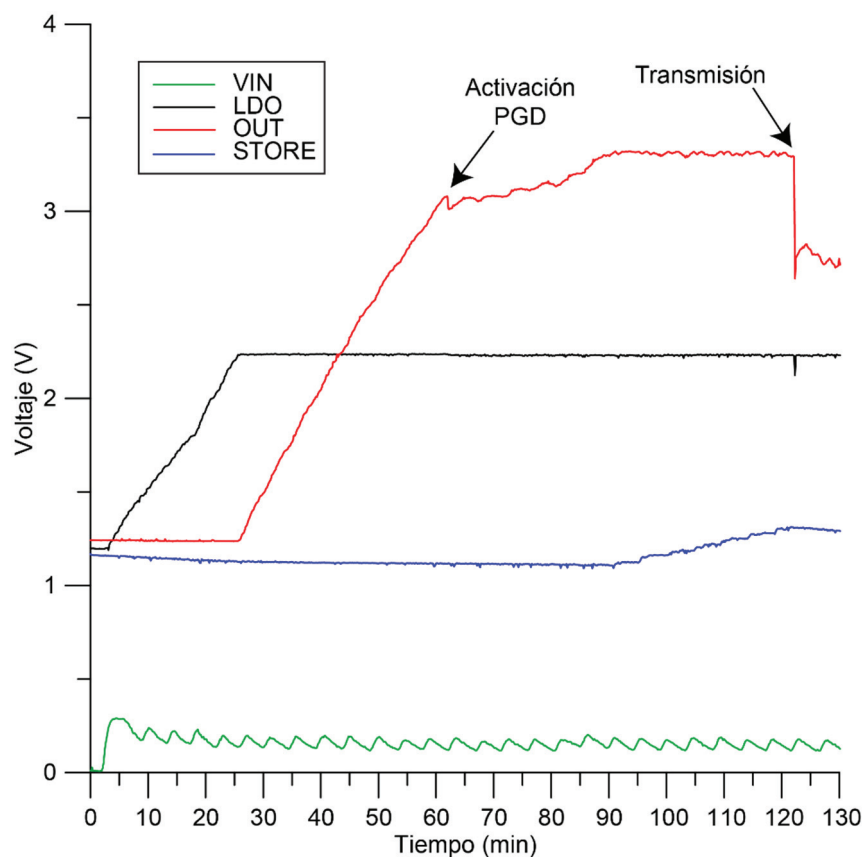


Figura 21 – Pruebas de carga en un ciclo continuo de operación en una vivienda.

Como se demuestra en la Figura 21, la activación de la señal de PGD fue mucho más rápida en esta ocasión, activándose en el minuto 72, marcando una clara diferencia de casi 40 minutos comparándolo a los resultados de la Figura 20. Este incremento en tiempo de carga a la larga permite que se acumule una mayor cantidad de energía en el supercondensador de STORE, el cual puede ser utilizado para cargar las otras salidas con mayor rapidez y conservar más energía para el día siguiente de operación. Cabe notar que

en estas pruebas se tuvo una generación promedio de 158 mV en VIN, lo cual también ayudó a cargar más rápido los supercondensadores. El tener una inicialización mucho más veloz a su vez permite al nodo tener más energía para transmisiones, por lo que se puede mencionar que, aunque no se muestra en la Figura 21, se logró realizar una transmisión más que en las pruebas de carga inicial.

3.6.2 Sostenibilidad del nodo sensor

La sostenibilidad se puede definir como la capacidad de un sistema, dispositivo o aplicación para perdurar por un periodo de tiempo definido o indefinido. Este concepto puede ser aplicado a sistemas como el que se propone en este capítulo, sin embargo, es necesario diferenciar las dos áreas en las que se puede aplicar, sostenibilidad energética y operacional, las cuales limitarán la aplicación en una ventana de operación muy específica. En este caso en particular, en un ciclo temporal de operación la sostenibilidad energética se ve determinada por dos factores principales, la cantidad de energía provista en las salidas del *energy harvester* y la energía consumida por la arquitectura central en sus actividades del estado activo y en su estado inactivo. Por otro lado, la sostenibilidad operacional se encuentra definida por la cantidad mínima de mediciones de temperatura que proveerán una información útil al usuario y la cantidad máxima de mediciones que se pueden realizar con la energía almacenada en el supercondensador del MCU.

Como se mencionó anteriormente, las condiciones iniciales de trabajo del nodo es un ciclo de operación con un periodo de 1 hora, donde solo una transmisión de datos es realizada. Con el bloque de *energy harvesting* presentado y los supercondensadores 2x100 mF utilizados para el MCU y *transceiver*, anteriormente se comprobó que con esta arquitectura se tiene suficiente energía para cada una de las actividades de los dispositivos y una inicialización con un tiempo razonable. Con estas mismas condiciones, se decidió realizar un análisis de sostenibilidad para poder encontrar la ventana de operación en la cual se podrán definir los mejores casos de aplicación para esta propuesta (Figura 22).

En la Figura 22 se realizaron cálculos para obtener la cantidad de energía consumida por diversos escenarios de captura de datos, basándose en los resultados de la Tabla 2, en un solo ciclo de operación con una transmisión. Además de esto se calculó la energía promedio disponible en la salida LDO con una diferencia de temperatura de 4.5 °C, medidos en la celda Peltier, durante el ciclo de tiempo especificado. En esta figura se muestran dos zonas delimitadas, una de color gris y otra de color verde, teniendo ambas como referencia la energía promedio generada con el gradiente de temperatura de 4.5 °C. La primera zona (gris) representa el rango máximo de captura de datos posibles con la energía promedio disponible en el ciclo de una hora, sin embargo, debido a la capacidad limitada del supercondensador, no toda esta energía se utiliza para realizar mediciones por el MCU al momento, si no que buena parte de ella se almacena en el reservorio de STORE como energía de respaldo.

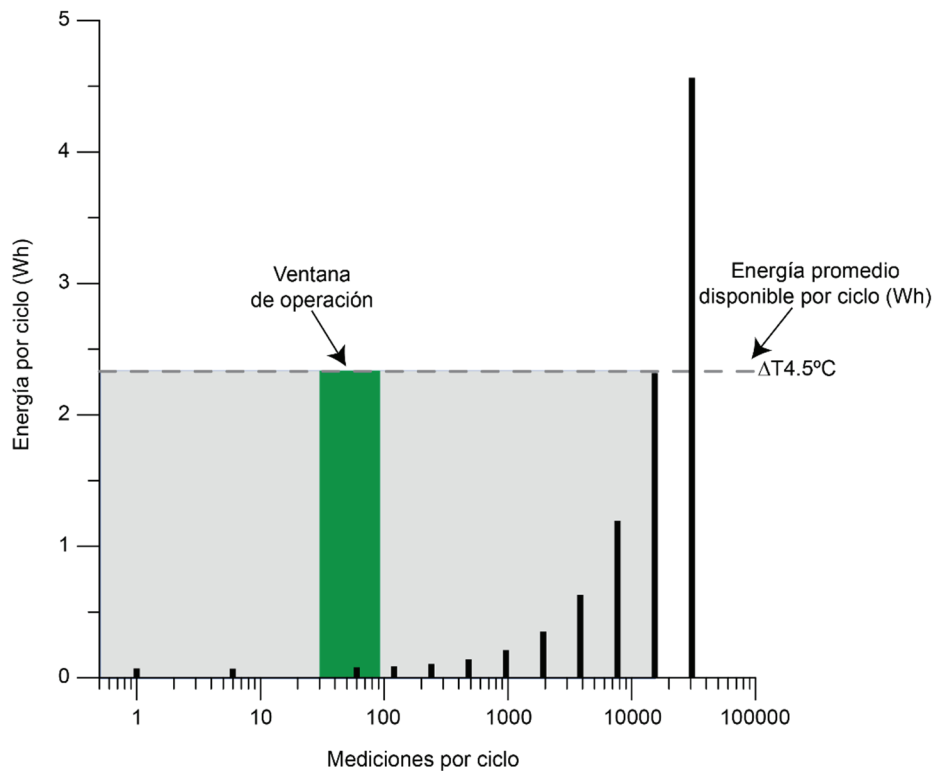


Figura 22 – Gráfico de sostenibilidad energética y operacional del nodo sensor bajo distintos escenarios de medición de datos. El área gris muestra el rango máximo de mediciones realizables con la energía promedio generada y el área verde es la ventana de operación recomendado para esta aplicación. Para este estudio, el ciclo de operación se considera de 1 hora.

Por otro lado, la zona verde representa la ventana de operación recomendable para la propuesta de este capítulo, donde el límite inferior se define como el número mínimo de mediciones requeridas para proveer información útil al usuario. Con un mínimo de 30 muestras por ciclo, es decir una medición cada 2 minutos, es posible dar una buena noción de las variaciones de temperatura medidas, aunque con ciertas limitaciones. El límite superior de la zona verde es un valor máximo recomendado, ya que es posible obtener una mayor cantidad de captura de datos por ciclo con la energía promedio obtenida. Sin embargo, no se recomienda superar el límite de 100 capturas por ciclo debido a que la temperatura es una variable que, en este caso, no oscila tan drásticamente y la información obtenida sería casi redundante, además de que haría un gasto excesivo de energía la cual podría ser utilizada para un reinicio de operación al día siguiente.

3.7 Discusión

La propuesta de aplicación presentada en este capítulo muestra una implementación de un nodo sensor inalámbrico con *energy harvesting* para la monitorización de sistemas

de calefacción en viviendas, donde la principal aportación al estado del arte de esta implementación es el uso de tecnologías WiFi en conjunto con *energy harvesting* termoeléctrico en un dispositivo sensor de bajo consumo energético. Además, se presenta un diseño de *energy harvester* de alta eficiencia y generación energética y una metodología para identificar la sostenibilidad de un nodo sensor. A continuación, se compara el trabajo realizado con las implementaciones de otros autores analizados en el estado del arte:

El bloque de *energy harvesting* de este capítulo puede ser comparado con el bloque de tres etapas utilizado en el nodo Tyndall de Wang *et al.* (Wang *et al.*, 2013), principalmente porque en su estudio ellos hacen una comparación con el integrado LTC3108, mismo que se utiliza en la propuesta aquí presentada utilizando un transformador 1:100, el cual presenta una baja eficiencia en la salida principal OUT como se muestra en la Figura 15. Sin embargo, si se utiliza un transformador 1:50 a 3.3 V, el mismo voltaje que utiliza el nodo Tyndall, se demostró que es posible obtener una eficiencia mínima de 40% hasta un 51% en la salida OUT, mientras que en el nodo Tyndall solo se logró obtener un 25.2% de eficiencia con el bloque de *harvesting* de tres etapas. Si se utilizara el bloque de *energy harvesting* propuesto en este capítulo con el nodo ZigBee Tyndall, solo sería necesario generar 2.6 mW por parte de la celda Peltier para que el *harvester* generara los 1.1 mW requeridos para este dispositivo, lo cual representa una reducción de casi el 50% de energía generada por la celda Peltier. Además, el uso de un bloque de *harvesting* como el aquí propuesto presenta la ventaja de tener suficiente flexibilidad para poder ser utilizado con otras fuentes de energía sin realizar grandes modificaciones al diseño.

En temática de comunicaciones, si se utilizara un protocolo ZigBee en vez de WiFi con el bloque de *energy harvesting* propuesto es posible que se consiguieran tiempos de arranque y niveles energéticos inferiores a los mostrados por WiFi, lo cual reduciría efectivamente el tamaño de los supercondensadores requeridos. Esto podría dar lugar a una mayor longevidad de nodo, sin embargo, al utilizar ZigBee sería necesario crear una infraestructura específica para el protocolo y agregar al menos un dispositivo adicional capaz de transferir los datos a servidores en la nube, como en el trabajo de Kelly *et al.* (Kelly, Suryadevara and Mukhopadhyay, 2013) o Nugroho y Sahroni (Nugroho and Sahroni, 2014). Estos requerimientos adicionales representan costes adicionales de proyecto y, debido a su poco uso por parte de la población general, podría crear un entorno difícil de usar para los usuarios. La ventaja que presenta WiFi en comparación a otros protocolos como ZigBee es que en la mayoría de los hogares es fácil encontrar una arquitectura IP, lo cual reduce costos de proyecto y simplifica la implementación de la red de sensores y debido a su familiaridad de uso tiende a tener una mayor aceptación y sencillez de interacción con los usuarios finales.

Nguyen y Le-trung (Nguyen and Le-Trung, 2014) presentan una propuesta similar al nodo de este capítulo, implementando una arquitectura de bajo consumo energético con WiFi para monitorización de edificios inteligentes, utilizando el mismo *transceiver* WiFi

(MRF24WB0MA) pero con un MCU de la familia PIC18. A pesar de que estos autores utilizan un microcontrolador con una arquitectura de 8 bits, su propuesta presenta una figura de consumo energético similar al nodo aquí mostrado. Una de las razones de esta similitud es debido a que el MCU PIC24 aquí utilizado opera con un voltaje de 2.2 V, en vez del típico 3.3 V, lo cual inherentemente reduce el consumo considerablemente. Además, el uso del oscilador LPRC para el arranque inicial también ayuda a reducir la demanda energética. Otra diferencia clave entre estas dos implementaciones es que Nguyen y Le-trung utilizan baterías (4 x 4200 mAh@3.7 V) para lograr un ciclo de operación de 46 días, contrario al uso de un bloque de *energy harvesting*. Sin embargo, para poder comparar ambas arquitecturas, si se utilizara este mismo paquete de baterías en la arquitectura aquí propuesta se calculó que el nodo sería capaz de operar por un periodo de 71 días, una cantidad notablemente mayor a la de Nguyen y Le-trung.

En las pruebas de validación realizadas por 24+ horas se comprobó que la implementación de este capítulo es una solución viable para la problemática propuesta, aunque idealmente sería deseable iniciar las mediciones tan pronto la salida LDO alcance su voltaje nominal de 2.2 V en vez de cuando se activa el pin de PGD. Este problema podría solucionarse con un circuito adicional que analice el nivel de voltaje de la salida LDO que habilite el MCU y así dejar el pin de PGD para ser analizado por el microcontrolador para saber cuándo se puede transmitir. Otra posible solución podría ser precargar los reservorios y así tener energía inmediata para inicializar el nodo, con lo cual se evitaría tener lapsos sin datos en el arranque y posiblemente en días consecutivos de operación, puesto que la mayor parte de la energía generada se podría almacenar en el reservorio de STORE.

Analizando la Figura 20 en profundidad, es posible notar que, aún en el arranque inicial del nodo, se genera suficiente energía para la operación e incluso almacenar parte de la energía. Teniendo en cuenta que existe un excedente de energía, aun cuando el voltaje de VIN era inferior al promedio esperado, resulta viable suponer que es posible incrementar el número de mediciones o hasta transmisiones por ciclo, adaptando así el nodo a distintos escenarios o ciclos de operación. Además, sería posible re-dimensionar el supercondensador de STORE de manera que ayude agilizar la inicialización del nodo con cada periodo de operación.

En la sección de sostenibilidad del nodo se sugiere una ventana de operación para la aplicación propuesta. Sin embargo, si se analiza a mayor detalle la Figura 22, es posible notar que aun teniendo un gradiente de temperatura inferior a 4.5 °C sería posible operar dentro de algunas de las condiciones propuestas en la ventana de operación, aunque se incrementaría el tiempo de arranque del nodo. Por otro lado, si se tuviera una diferencia de temperatura mayor el tiempo de arranque se minimizaría, se tendría mayor energía para almacenar y sería viable poder incrementar el número de mediciones por ciclo o utilizar supercondensadores de mayor capacidad para poder realizar más transmisiones de datos por ciclo.

3.8 Conclusiones

En este capítulo se presentó un nodo sensor WiFi autónomo para auditar dispositivos de calefacción en espacios de vivienda, donde se realizó un análisis a fondo de la arquitectura central del nodo para proveer al lector con un entendimiento de las necesidades energéticas de un dispositivo con estas características. Posteriormente se realizó un análisis completo del bloque de *energy harvesting*, donde se estudió la capacidad de generación de la celda Peltier a utilizar, se analizó el comportamiento del integrado que gestionaba la energía generada (LTC3108) y se realizaron los cálculos necesarios para la selección de todos los componentes adicionales necesario para el correcto funcionamiento de este gestor energético. El bloque de *energy harvesting* mostró una alta eficiencia y capacidad de generación comparado a otras implementaciones estudiadas, además de que se comprobó su viabilidad de uso en aplicaciones de consumo energético elevado. Estos bloques fueron utilizados en conjunto en un escenario de prueba práctico por más de 24 horas continuas, con lo que se validó el correcto funcionamiento del nodo en su totalidad para entornos de viviendas inteligentes.

El uso de sensores WiFi como parte de una red de sensores inalámbricos para IoT no solo resulta muy viable, también simplifica su implementación gracias a su red ampliamente distribuida en entornos urbanos e industriales. Existen una gran variedad de escenarios de aplicación donde sensores WiFi pueden ser utilizados para transferir datos ambientales a la nube directamente, obviando así la necesidad de protocolos intermediarios. Por último, tras los análisis realizados, este tipo de nodos claramente pueden utilizar distintos tipos de tecnologías de *energy harvesting* para cubrir su consumo energético o como sistema de respaldo para recargar las baterías primarias del sistema y extender la vida útil de los dispositivos.

Capítulo 4: Sistema de monitorización no supervisado para zonas ecológicas protegidas

Se expone una necesidad existente sobre el análisis de variables marítimas y ambientales en reservas naturales protegidas de una manera más detallada, económica y sencilla de implementar. En base a esto, se presentan los diversos retos presentes en los despliegues electrónicos en ambientes marinos y se realiza una evaluación del estado del arte de los métodos más comunes para captar estas variables, así como de las nuevas prácticas realizadas por investigadores. Posteriormente, se plantea la arquitectura del sistema propuesto, definiendo los distintos escenarios de comportamiento deseados. Aunado a esto, se describen los componentes que forman la red, las actividades que realizan dentro de ella y los dispositivos adicionales de la misma. El sistema monitorización inalámbrico es caracterizado y evaluado a nivel de red, tanto en laboratorio como en campo. Por último, se integra los componentes de la red con los dispositivos oceanográficos para su validación, sobre la cual se presenta una discusión sobre los resultados obtenidos y las conclusiones correspondientes.

4.1 Monitorización en ambientes marinos

La monitorización para preservación ambiental es un área de gran interés para los sensores remotos, ya que permite estudiar los cambios que los distintos entornos y ecosistemas sufren a lo largo del tiempo, tanto por el impacto del cambio climático como

por las actividades humanas. Se ha realizado una gran variedad de implementaciones en distintos tipos de campos de estudio: dentro de la preservación ambiental, incluyendo el trabajo de Molina-Pico *et al.* (Molina-Pico *et al.*, 2016b) en monitorización de bosques; Nakagawa *et al.* (Nakagawa, Kobayashi and Sezaki, 2014) y Dyo *et al.* (Dyo *et al.*, 2012) en preservación de fauna; o Brun-Laguna *et al.* (Brun-Laguna *et al.*, 2016) en agricultura de precisión.

Otro campo de estudio de alta relevancia es la monitorización de ambientes marinos, en el cual se desarrolla el proyecto SIMMA. Esta propuesta se encuentra orientada específicamente a la preservación de zonas costeras en México, donde se pretende extraer distintas variables ambientales por intervalos de tiempo. De esta forma, se busca entender mejor el movimiento de las corrientes, como han cambiado las condiciones climáticas y como han afectado al entorno en una zona dada. La monitorización en ambientes marinos ha cambiado poco en las últimas décadas, la mayoría de las implementaciones se basan en imágenes vía satélite, dispositivos submarinos sensorizados y en despliegues con boyas. Esta última es quizá la más común de todas las anteriores, siendo utilizada para la captación de múltiples variables ambientales, ya sea de manera estática o dejándose a la deriva, y pudiéndose dejar por periodos extendidos de tiempo. Al día de hoy, de acuerdo a los datos del National Data Buoy Center (NOAA, 2019a) y The Global Drifter Program (NOAA, 2019b), se encuentran desplegadas 763 boyas estacionarias y 585 boyas de arrastre.

A pesar de la popularidad de las boyas como dispositivo de monitorización, estas presentan varias desventajas, sobre todo en el despliegue de múltiples unidades sobre una misma zona. Una de ellas es el proceso de extracción de los datos ambientales, el cual se hace comúnmente de tres maneras: transmisiones de largo alcance, transmisiones de corto alcance o recolección de datos en tierra. Las transmisiones de largo alcance tienden a estar enfocadas principalmente hacia comunicaciones vía satélite, ya que resulta un método muy práctico para obtener datos, bajo demanda o por intervalos de tiempo, de dispositivos que pueden estar tanto en alta mar como en zonas costeras. En los casos de transmisiones de corto alcance o extracción en tierra, es necesario utilizar una embarcación marítima, por lo general grande, para poder llegar a las boyas y extraer los datos inalámbricamente o directamente extraerlas de la zona de monitorización. Estos métodos presentan un problema en común, un alto impacto económico, ya sea en el coste mensual, de mantenimiento, transporte marítimo u horas de personal, que hace que los proyectos de monitorización sean difícilmente sostenibles por largos periodos o en grandes despliegues.

Por otro lado, las implementaciones de sistemas electrónicos presentan una alternativa importante; no obstante, es importante notar que cualquier desarrollo en ambientes marítimos es un desafío inherente por sí solo, ya que el entorno resulta altamente hostil para los dispositivos. Los despliegues marítimos, a diferencia de los terrestres, presentan retos como los siguientes (Xu, Shen and Wang, 2014a):

- **Alta resistencia al agua:** Por el tipo de ambiente acuático, cualquier dispositivo requiere tener un nivel de estanqueidad muy alto nivel para evitar el contacto de la electrónica con agua o altos niveles de humedad. Para esto se debe seguir lo estipulado en la norma IEC 60529 de grados de protección (National Electrical Manufacturers Association, 2019).
- **Alto nivel de robustez:** Se requieren dispositivos que sean capaces de tolerar las inclemencias del ambiente como las colisiones del oleaje, corrientes marítimas, climas extremos, colisiones con embarcaciones o rapiña animal.
- **Inestabilidad de transmisión:** Debido al movimiento del oleaje, en muchos casos, las transmisiones se vuelven inestables por la falta de línea de vista entre *transceivers*.
- **Dificultad de despliegue y mantenimiento:** Estas actividades se ven restringidas debido a las condiciones climáticas de la zona y al uso de embarcaciones para su realización.
- **Cobertura de red:** Debido a lo remotas que pueden ser algunas zonas, tecnologías de comunicaciones GSM/CDMA y similares suelen ser inexistentes, por lo que no todas las opciones de protocolos resultan viables.
- **Vandalismo:** Este tipo de actos resultan comunes, principalmente para extraer componentes de interés como paneles solares, baterías u otros componentes de valor.

Habiendo descrito los retos de monitorización que se presentan en los ambientes marinos, en la siguiente sección se hará un análisis con mayor detalle de algunas de las aplicaciones que se han realizado en este tipo de ambientes. Con esto se busca poner en perspectiva el trabajo presentado en esta tesis y así poder resaltar las contribuciones realizadas en este campo de aplicación.

4.2 Estado del arte y aplicaciones específicas

4.2.1 Sistemas de monitorización marina

Existen diversos tipos de sistemas para monitorización marina, los cuales se enfocan en la captación de distintas variables físicas, ya sean superficiales, atmosféricas o submarinas. No obstante, es posible clasificarlos en cuatro categorías desde la perspectiva de su tipo de implementación: dispositivos de deriva, dispositivos de anclaje, vehículos no tripulados y sistemas híbridos.

Los dispositivos de deriva utilizan el método más sencillo y quizá más antiguo en el estudio marítimo, soltar un objeto en el agua y dejar que la corriente lo lleve. Estos

dispositivos son utilizados fundamentalmente para estudiar el movimiento de las corrientes en mar abierto o zonas costeras, por lo que usualmente se encuentran equipados con comunicaciones vía satélite para la transmisión de datos y GPS (*Global Positioning Systems*) para su ubicación. Existen dos tipos de dispositivos de deriva, los de deriva superficial, los cuales suelen ser aparatos instrumentados en formas cilíndricas o cometas; y los flotantes, que además de ser arrastrados por las corrientes, utilizan sistemas para cambiar su flotabilidad y así poder sumergirse por periodos de tiempo y emerger a la superficie para transmitir datos vía satélite (Woods Hole Oceanographic Institution, 2019a). Ejemplos de estos dispositivos se encuentran en el trabajo de Bushinsky *et al.* (Bushinsky *et al.*, 2016), quienes modificaron varios flotadores Argo, un dispositivo que recolecta datos de temperatura y salinidad en el mar, para recolectar medidas de oxígeno cada 5 o 10 días y transmitir estas vía satélite; o Lumpkin y Johnson (Lumpkin and Johnson, 2013) que utilizaron flotadores de deriva superficial que fueron rastreados satelitalmente para medir la velocidad de las corrientes y trazar los patrones de circulación oceánica, para poder describir distintos cambios atmosféricos.

Los dispositivos de anclaje son plataformas que permiten observar los cambios en los océanos y el suelo oceánico por periodos extendidos de tiempo. En esencia, son cables de gran longitud instrumentados con diversos dispositivos para toma de mediciones que se encuentran anclados al suelo marítimo y fijados a algún dispositivo flotante, como podría ser una boya. Existen dos variantes de dispositivos de este tipo: los sub-superficiales, que se fijan a un flotador ubicado por debajo de la superficie marítima y que se utilizan para observar las corrientes oceánicas y diversas propiedades del agua; y los superficiales, que se fijan a flotadores en la superficie del mar y sirven para medir la temperatura del agua, salinidad y las corrientes marinas, además de captar variables ambientales como la velocidad del viento, radiación, humedad relativa, presión, precipitación y otros desde su flotador en la superficie (Woods Hole Oceanographic Institution, 2019b). Estos dispositivos comúnmente transmiten los datos vía satélite o por comunicación serie, es decir, son recogidos y posteriormente se realiza la extracción. Dentro de estos dispositivos es posible encontrar aplicaciones como la de Rainville y Pinkel (Rainville and Pinkel, 2001) un perfilador acústico llamado Wirewalker que utiliza el movimiento de las olas y un sistema de flotación para subir y bajar a través del cable anclado para realizar diversas mediciones; Osse *et al.* (Osse *et al.*, 2015) quienes realizaron otro perfilador oceánico llamado Prawler que solo utiliza el movimiento de las olas para recorrer el cable anclado y que, al acercarse a la boya superficial, transmite los datos con un sistema inductivo al flotador, el cual se encarga de transmitir los datos con comunicaciones vía satélite; o Lin *et al.* (Lin *et al.*, 2018) quienes utilizaron seis años de datos adquiridos por un conjunto de dispositivos de anclaje tradicionales para entender los factores claves y las características generales en las zonas de surgencias en el mar de Beaufort en Alaska.

Los vehículos no tripulados son dispositivos capaces de realizar recorridos con poca o nula interacción humana e ir captando variables de interés. Éstos cuentan con memorias externas (tarjetas SD, memoria flash, etc.) para el almacenamiento de los datos y posteriormente, tras su regreso a base, estos sean extraídos de manera segura usualmente por comunicación serie. Existen tres variantes: los ROUV (*Remotely Operated Underwater Vehicle*) o ROV, como se les conoce comúnmente, los cuales son vehículos sumergibles que son manejados por radiofrecuencia o una línea física de comunicaciones y son utilizados para hacer mediciones en zonas marítimas muy profundas y riesgosas para el ser humano como geiseres submarinos (Whitcomb, 2000); los AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) los cuales son vehículos submarinos ligeros que operan principalmente en zonas cercanas al suelo oceánico para realizar mapeos o recolección de datos (J. Yuh, 2000); y los UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) o dron, los cuales son vehículos aéreos capaces de cubrir áreas muy extensas, debido a sus comunicaciones de largo alcance, y comúnmente son usados para realizar capturas de imágenes en distintos espectros (luz visible, infrarroja, ultravioleta, etc.) (Bendig, Bolten and Bareth, 2012). En el caso de los UAV, a pesar de no ser exclusivos a los ambientes marinos, su uso ha sido fomentado debido a que es un método de monitorización que provee información comparable a la de los satélites, con imágenes de mucha más resolución aunque en menor extensión geográfica, a un costo de operación considerablemente menor (SenseFly, 2019). Algunos ejemplos de estos dispositivos siendo aplicados a monitorización marítima, son el trabajo de Hodgson *et al.* (Hodgson, Kelly and Peel, 2013) o Bevan *et al.* (Bevan *et al.*, 2015) quienes utilizan UAVs con cámaras fotográficas y de vídeo para localizar animales marinos como dugongos y tortugas como sustituto de observaciones en persona; el Deep Discoverer (Ocean Exploration and Research-NOAA, 2019a) y el Hercules (Ocean Exploration and Research-NOAA, 2019b) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), unos ROVs equipados con tecnología de punta para la toma de muestras de suelos oceánicos y búsqueda de navíos hundidos en las profundidades; o el trabajo de Faria *et al.* (Faria *et al.*, 2014) quienes utilizaron un UAV y AUV para realizar observaciones y seguimientos coordinados en costas oceánicas.

Por último, los sistemas híbridos son una mezcla de tecnologías con las que se busca superar alguna limitante existente; un ejemplo típico son las boyas que captan variables ambientales superficiales, que además cuentan con un sistema de anclaje con sensores subacuáticos similar al Wirewalker o Prowler antes mencionados. Aunado a esto, también se han realizado sistemas híbridos utilizando UAVs y boyas, como se muestra en el trabajo de Zolich *et al.* (Zolich *et al.*, 2016) y Barbatei *et al.* (Barbatei, Skavhaug and Johansen, 2015). Los primeros proponen el uso de un UAV con comunicaciones Tiny Mesh 868 para recolectar datos de boyas estacionarias de bajo consumo energético y costo, las cuales van a proveer datos submarinos de diversos sensores. Barbatei *et al.* utilizan un diseño de arquitectura de red bastante similar, con un UAV como recolector de datos y un diseño

modular de boyas estacionarias, capaz de portar múltiples sensores, un GPS, comunicaciones FSK 868 para transmisión de datos y almacenamiento en memoria SD.

Como se puede apreciar, estos sistemas resultan muy heterogéneos entre ellos, teniendo como único común denominador el área de estudio general. No obstante, Si se comparan estos dispositivos desde el punto de vista de medios de comunicación, se puede notar que existen ciertas tendencias entre ellos. Hay una clara inclinación al uso de medios alámbricos (comunicación serie), donde las descargas se realizan en tierra, y vía satélite, donde se pueden realizar peticiones de datos bajo demanda siempre y cuando exista un enlace a constelaciones Iridium (Intven, Oliver and Sepúlveda, 2018). Analizando los sistemas con comunicación serial, no se presenta una desventaja electrónica en sí, pero su mayor inconveniente es el no poder contar con la información sensada bajo demanda, por lo que estos sistemas solo pueden ser utilizados para análisis de datos *a posteriori*. Además, estos sistemas pueden llegar a ser extraviados, ya sea por fuertes corrientes que los sacan del área de monitorización o por problemas de vandalismo. Esto último resulta un problema común y de gran peso, ya que no solo se pierde por completo la información adquirida sino también el o los dispositivos de monitorización, generando pérdidas económicas considerables.

Por otro lado, las comunicaciones vía satélite permiten tener la información bajo demanda y desde cualquier lugar con el que se cuente con una conexión a Internet para la descarga de datos, siendo estas las razones principales por las que su uso se ha masificado en este tipo de aplicaciones. Sin embargo, estos sistemas presentan consumos elevados de corriente, teniendo picos con demandas superiores a 1 A, lo cual precisa el uso de baterías de alta capacidad que usualmente superan las decenas de amperios hora (Gordon, 2017). Una alternativa a éstas, son las fuentes de alimentación híbridas, que utilizan baterías de alta capacidad y paneles solares, para así poder extender la longevidad del nodo sensor. Aunado a estos inconvenientes, su uso representa costos periódicos para acceder a la información en los satélites, así como buena visibilidad de los mismos en el área de monitorización.

Buscando reducir los consumos energéticos y los costos adicionales a proyecto, se han realizado diversas propuestas con métodos alternativos para la monitorización marítima, manteniendo la posibilidad de obtener los datos bajo demanda o lo más cercano a ello. Los trabajos de Zolich *et al.* (Zolich *et al.*, 2016) y Barbatei *et al.* (Barbatei, Skavhaug and Johansen, 2015) son ejemplo de ello. Ambas propuestas utilizan metodologías de WSN con dispositivos y comunicaciones con consumos energéticos reducidos, además modos de bajo consumo energético para intervalos de inactividad de comunicaciones. Esto representa una gran ventaja, puesto que es posible utilizar fuentes de alimentación de baja capacidad o fuentes alternativas de manera exclusiva. No obstante, su mayor limitante es el rango de alcance de sus comunicaciones inalámbricas, las cuales no superan los 500 metros entre los dispositivos sensores y el dron recolector de datos. Esta restricción de rango de

transmisión resulta problemática en grandes despliegues de nodos sobre un área extendida, principalmente por el tiempo de vuelo que tienden a tener los drones aéreos, el cual se limita a decenas de minutos.

4.2.2 LoRa WSN para monitorización ambiental

Tras describir los sistemas de monitorización marítimos más comunes, las propuestas de sistemas híbridos presentan una alternativa de gran interés, al combinar las metodologías de WSN con UAV. Sin embargo, es clara la limitante que presentan las implementaciones descritas para sistemas de desean cubrir una gran extensión de superficie, el rango de transmisión.

Dentro de las WSN, existen múltiples protocolos viables para la monitorización ambiental; no obstante, las opciones se reducen considerablemente cuando la cobertura de red necesaria es del orden de las decenas de kilómetros cuadrados. Los protocolos LPWAN resultan de gran interés para este tipo de aplicaciones, debido los rangos de transmisión que son capaces de lograr con demandas de potencia bajas. Dentro de esta categoría se encuentra catalogada la modulación LoRa (*Long Range*) (Vangelista, 2017), una tecnología patentada por la empresa Semtech. LoRa es una implementación de la capa PHY de espectro ensanchado, derivada de la tecnología *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que ofrece un rango de transmisión superior a los 15 km (campo abierto) con una alta inmunidad a la interferencia, gran penetración de señal y múltiples configuraciones de ancho de banda y frecuencia (Semtech Corporation, 2015). Esta modulación cuenta con cuatro parámetros principales para su configuración: *spreading factor* (SF), *bandwidth* (BW), *coding rate* (CR) y *payload*, con los cuales es posible modificar la energía necesaria para la transmisión-recepción (*link Budget*), la inmunidad a la interferencia, el uso del espectro y la tasa de transferencia de datos nominal. Esta alta flexibilidad permite a los diseñadores de red ajustar los parámetros para encontrar el mejor equilibrio entre las distancias de transmisión requeridas y la velocidad de transferencia de datos. Además, LoRa es capaz de operar en un rango amplio de frecuencia Sub-GHz, desde los 100 – 1000 MHz, lo cual le permite operar en bandas de frecuencia libres a nivel global (Semtech-Corporation, 2013).

El protocolo más ampliamente distribuido para la modulación LoRa es LoRaWAN (Semtech, 2019b), un protocolo desarrollado por LoRa Alliance. Ésta implementación se desenvuelve en la capa MAC y utiliza una topología de red tipo estrella para enviar información de manera asíncrona entre nodos y puertas de enlace (*Gateway*); esto permite reducir el consumo de batería de los dispositivos de manera considerable, a comparación de otros protocolos síncronos. Además, el protocolo incorpora metodologías de seguridad para las capas de red y aplicación, algo que resulta de gran interés en diversos campos de aplicación que utilizan soluciones LPWAN. Dentro de este protocolo, LoRaWAN define tres clases de dispositivos: sensores con baterías (clase A), actuadores con baterías (clase B) y

actuadores conectados a la red eléctrica (clase B), variando entre ellos la latencia de comunicaciones y consumo energético (LoRa Alliance, 2015).

Como se mencionó anteriormente, LoRa es una modulación para cubrir regiones físicas muy amplias, por lo que en la literatura es posible encontrar múltiples desarrollos orientados a la preservación ambiental. Algunos de ellos son los casos de:

- Reda *et al.* (Reda *et al.*, 2017) quienes proponen una red LoRa de distribución de información meteorológica para agricultores y ganaderos, particularmente en países en desarrollo, donde el acceso a la información puede ser limitado.
- Luka *et al.* (Lukas, Tanumihardja and Gunawan, 2016) que realizan un despliegue de sensores de nivel de agua en bebederos para animales en granjas, los cuales se encuentran a varios kilómetros de distancia de las casas de los granjeros, que se enlazan con una Raspberry Pi para despliegado visual de la información y activación de alarmas.
- Ahlers *et al.* (Ahlers *et al.*, 2016) quienes implementaron un sistema de monitorización LoRa para la detección de emisiones de gases invernadero en Noruega, utilizando paneles solares y baterías recargables para incrementar la longevidad de los nodos.
- Abu-Mahfouz *et al.* (Orfei, Benedetta Mezzetti and Cottone, 2017) que proponen un sistema dinámico de detección y manejo de la red de distribución de agua en Sudáfrica, con el objetivo de reducir pérdidas del recurso, utilizando una red híbrida LoRa/ZigBee.
- Wu *et al.* (Wu *et al.*, 2018) quienes presentan una plataforma IoT de tecnología vestible (*wearable devices*) para la detección de variables ambientales que pudieran presentar un riesgo para la salud.

4.3 Propuesta de sistema

El proyecto SIMMA busca realizar análisis marítimos de corrientes superficiales en líneas costeras de zonas protegidas, con lo cual se pretende comprender los cambios en esta zona y su afectación al ecosistema. El realizar este tipo de análisis en zonas protegidas, como el parque nacional Cabo Pulmo de México, conlleva ciertas restricciones, puesto es necesario utilizar sistemas de monitorización poco invasivos para evitar alteraciones al ambiente y, debido a la naturaleza remota de la zona, se requiere que el sistema sea lo más portable posible. Por estos motivos, se presenta una fuerte necesidad a una alternativa de monitorización que le permita realizar despliegues multipunto en la zona de interés y así

poder extraer datos de mayor precisión con un costo de infraestructura y mantenimiento mucho más reducido (Figura 23).



Figura 23 - Ejemplo de aplicación requerido para despliegue para el proyecto SIMMA.

Al momento del estudio, el sistema que se utilizaba estaba formado por boyas de deriva superficial con un GPS comercial para captar el movimiento de dichas boyas y un dron con cámara para realizar ortomosaicos de la zona y hacer comparaciones de degradación en un espacio de tiempo. Este sistema aporta datos útiles para los análisis de línea costera, sin embargo, con el proyecto SIMMA se busca ampliar las variables ambientales que se captan para poder realizar estudios de mayor profundidad científica y por periodos más prolongados, manteniendo un sistema simple de desplegar, pero también capaz de cubrir una mayor extensión de área.

Para intentar solventar los retos presentados por el proyecto SIMMA, y habiendo analizado los sistemas de monitorización marítimos que se han implementado, se concluyó que la mejor ruta para cumplir con sus objetivos era utilizando una arquitectura de sistema híbrido, similar al de Zolich *et al.* (Zolich *et al.*, 2016) y Barbatei *et al.* (Barbatei, Skavhaug and Johansen, 2015). Específicamente, la propuesta que se realizó fue la de utilizar un despliegue tipo WSN con múltiples boyas de deriva actuando como nodos sensores ambientales, cubriendo una gran extensión de costa, y utilizar un UAV como recolector de datos y enrutador de red dinámico.

Dentro del sistema SIMMA se contemplan dos escenarios de funcionalidad: extracción de datos y rescate. Para ambos casos, las boyas estarán recolectando periódicamente datos temperatura del ambiente, temperatura del agua, presión atmosférica, humedad relativa, velocidad del viento y sus coordenadas GPS. En el escenario de extracción de datos, una vez que las boyas han sido liberadas en la línea costera y éstas han recolectado datos de su entorno, el UAV será pilotado, ya sea manual o autónomamente, en dirección de la última posición conocida de las boyas y buscándolas constantemente. Habiendo encontrado las boyas, el dron comenzará a transmitir mensajes de solicitud de datos para recolectar la información que hayan almacenado las boyas. Si el

dron completase la tarea asignada o se quedase sin batería, éste realizaría una ruta de vuelta al punto de origen del cual despegó inicialmente. Para poder tener una noción sobre las actividades e interacciones que tiene el dron con las boyas, será posible tener un dispositivo opcional auxiliar que funcionará como monitor de red exclusivamente, recibiendo réplicas del UAV sobre sus actividades solamente, sin poder interactuar con el dron (Figura 24).

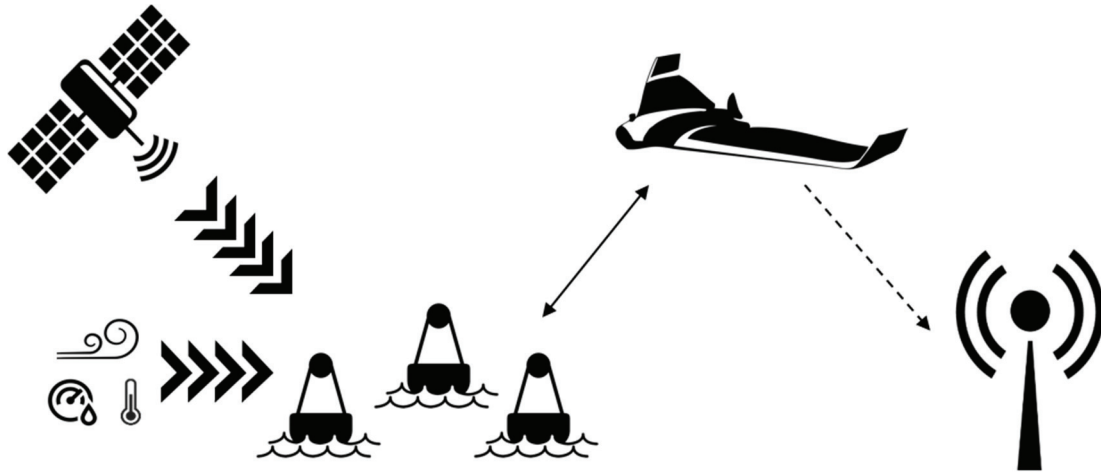


Figura 24 – Interacciones entre los distintos dispositivos de la red. La flecha continua indica el flujo principal de transmisión de datos, la flecha discontinua representa las comunicaciones con la estación en base opcional y las otras indican la información ambiental entrante a las boyas.

En el segundo escenario, el de rescate, el dron se utilizará para localizar boyas que no han sido encontradas cerca de las demás, es decir, que se pudieron ir a la deriva más allá de lo esperado. Dado que las boyas se pudieran encontrara varadas o en una ubicación lejana, el UAV realizará vuelos en la dirección hacia donde se sospecha pudiera estar, ya sea por su última ubicación GPS o por conocimiento empírico de las corrientes, tratará de obtener la posición GPS de cualquier boya que encuentre en la ruta trazada. Este modo de operación se implementó para poder recuperar las boyas, las cuales se tienden a perder debido a fuertes corrientes o vandalismo (Reyes-Guerrero *et al.*, 2011; Xu, Shen and Wang, 2014a, 2014b).

Desde el punto de vista de sistemas de monitorización marítimos, la diferencia que se encuentra en esta propuesta con respecto a la de Zolich *et al.* (Zolich *et al.*, 2016) y Barbatei *et al.* (Barbatei, Skavhaug and Johansen, 2015), es el uso de dispositivos sensorizados de deriva con drones. Al utilizar dispositivos de deriva, el uso de radiocomunicaciones se complica en gran medida, ya que mantener un enlace estable con comunicaciones de corto alcance, como las presentadas anteriormente, requeriría que el o los drones tuvieran que estar siguiendo a las boyas mientras se realiza la descarga de datos. Debido a lo complejo que esto resultaría, se optó por utilizar un tipo de comunicaciones inalámbricas que tuviera un mayor rango de transmisión como característica principal, con

lo cual se podría tener un enlace de comunicaciones estable por más tiempo, aunque el dron o las boyas estén en constante movimiento.

Tomando lo anterior en cuenta, se seleccionó la modulación LoRa como medio de comunicación, debido principalmente a su alta flexibilidad en rango de transmisión, tasa de transferencia de datos y rango de operación frecuencial. Además de esto, con la alta inmunidad al ruido externo que presenta esta modulación, es capaz de coexistir con otras radiocomunicaciones con poca o nula interferencia (Semtech, 2015a). Esta última característica resulta crítica en una red asistida por UAV, debido a que los drones utilizan diferentes tipos de radiotransmisiones en bandas UHF para transmitir video, información de navegación y comandos de control de vuelo, y cualquier falló en comunicaciones por interferencia podría significar la pérdida del vehículo.

El uso más común de la modulación LoRa es a través del protocolo de comunicaciones LoRaWAN; sin embargo, el protocolo cuenta con algunas restricciones de configuración de parámetros (*spreading factor*, *bandwidth*, *CR*) y frecuencias de operación (LoRa Alliance, 2017), además de presentar un uso alto de cabeceras de paquete. Esto limita en algunos casos las opciones de rango de transmisión e influye directamente en el consumo energético de las comunicaciones. Por estas razones, se optó por desarrollar un protocolo propietario específico para esta propuesta, buscando explotar todas las posibilidades que ofrece la modulación.

Habiendo realizado la descripción del proyecto SIMMA y un diseño a nivel bloques de la propuesta de implementación, en las siguientes secciones se abordarán las distintas etapas del desarrollo realizado como se presenta a continuación:

- 1) Se realizará un análisis de las características principales de la modulación LoRa desde las perspectivas de radiofrecuencia y de consumo energético. El objetivo de estos estudios es el de tener un entendimiento completo de la modulación para así poder desarrollar de la manera más adecuada el protocolo de red para esta misma y definir los modos de operación óptimos, tanto en alcance como en uso energético, para el sistema de monitorización.
- 2) Se efectuarán pruebas de rango de transmisión en campo abierto buscando validar la capacidad de la tecnología y sus posibles limitantes, lo cual fungirá como base para las futuras pruebas del sistema completo.
- 3) Se presentará la propuesta de protocolo de red para la modulación LoRa, donde se mostrará sus principales características de funcionamiento, alcance y estructura jerárquica de dispositivos.
- 4) Se describirá en detalle la arquitectura del sistema propuesto para este proyecto desde una perspectiva de los dispositivos que la constituyen y del

diseño electrónico implementado, incluyendo *hardware*, *firmware* y *middleware*. Con esto se busca enfatizar el trabajo realizado para la realización del sistema y las aportaciones tecnológicas que se presentan a revisión.

- 5) Por último, se presentarán las pruebas realizadas para la validación del sistema de monitorización, tomando en cuenta los pasos necesarios para verificar su comportamiento en un entorno de laboratorio hasta su despliegue final en campo. Con esto se mostrará al lector los resultados obtenidos, los cuales se utilizarán para contrastar con las propuestas de monitorización actuales.

4.4 Análisis de la modulación LoRa

Como se describió anteriormente, la modulación LoRa es un tipo de radiocomunicaciones muy flexible y capaz de adaptarse a distintos entornos de aplicación. Las comunicaciones LoRa pueden operar en diversos rangos de frecuencia sub GHz y cuenta con cuatro parámetros principales para su configuración: *spreading factor* (SF), *bandwidth* (BW) y *coding rate* (CR). La modulación se realiza representando cada bit de información del *payload* con múltiples chips de información; la razón a la cual la información ensanchada es enviada se le conoce como el *symbol rate* y el *spreading factor* representa la razón entre el *symbol rate* y el *chip rate*, es decir, el número de símbolos enviados por bits de información. Este parámetro va desde los 2^6 a 2^{12} chips/symbol y con cada uno se modifica la sensibilidad del receptor, con lo cual se aumenta el rango de transmisión a costa de una reducción de tasa de transferencia de datos. El *bandwidth* se refiere al ancho de banda del canal completo de transmisión LoRa, con el cual es posible aumentar la tasa de transferencia de datos, mermando ligeramente la sensibilidad del receptor; éste cuenta con diez opciones distintas, desde los 7.8 kHz hasta los 500 kHz. Por último, el *coding rate* es un parámetro que aumenta la robustez del enlace de transmisión a través de correcciones de error cíclicas, para lo cual cuenta con cuatro opciones de configuración. Con estos parámetros, el diseñador puede modificar la energía necesaria para la transmisión-recepción (*link budget*), la inmunidad a la interferencia, el uso del espectro y la tasa de transferencia de datos nominal (Semtech, 2015b). Sin embargo, tan solo realizando una descripción de los parámetros de configuración de RF no permite comprender cómo afecta cada uno al desempeño de la modulación, por lo que fue necesario realizar un análisis mucho más a fondo; lo cual servirá para poder diseñar apropiadamente el protocolo de red propietario.

4.4.1 Ensayos de frecuencia de operación

Para poder evaluar la modulación LoRa, se utilizó el módulo inalámbrico RN2483 de Microchip (Microchip, 2017), el cual está conformado internamente por un microcontrolador PIC18LF45K22 y un *transceiver* SX1276 de Semtech, capaz de transmitir desde los 137-1020 MHz. Este amplio rango frecuencial permite a su vez comparar entre dos frecuencias de operación de interés, la de 868 MHz y la de 433 MHz, ambas de uso libre en distintas regiones. Para poder manipular el módulo LoRa, se montó el integrado RN2483 en una PCB *ad hoc* que permite reprogramar el microcontrolador interno y acceder a los pines de comunicación serie, con lo cual es posible conectar el módulo a un puerto de comunicación serial para envío de comandos (Figura 25). El módulo por defecto cuenta con el protocolo LoRaWAN pero, para efectos de estas pruebas, fue borrado y se desarrolló un firmware capaz de manejar la modulación LoRa directamente.

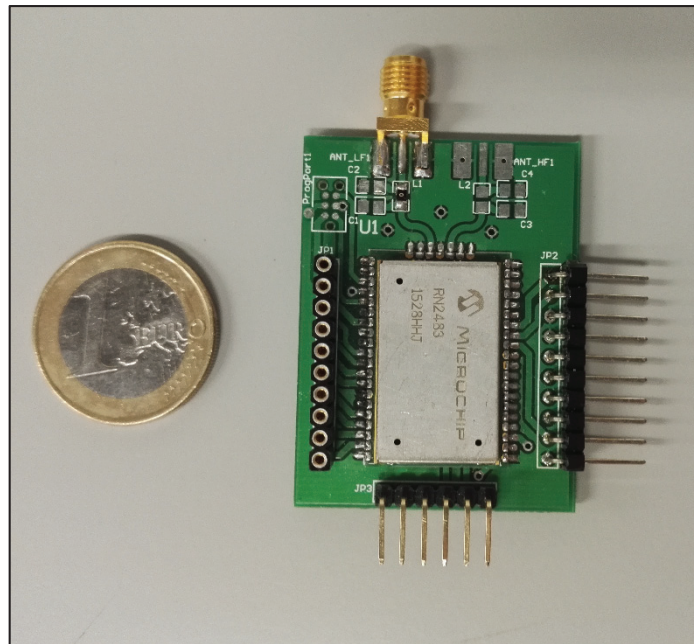


Figura 25 – Módulo RN2483 montado sobre la PCB para pruebas LoRa.

Como primera prueba, se buscó comparar las frecuencias de operación de 868 MHz y 433 MHz en un entorno de campo abierto con línea de vista entre receptor y transmisor. El objetivo de esta prueba es la de comparar estos dos rangos frecuenciales para entender las ventajas que se presentan entre uno y otro. De forma teórica las frecuencias de transmisión bajas tienen una mayor penetración de señal, lo cual se ve representado como un incremento en rango de transmisión, sin embargo, es importante cuantificar la diferencia real que existe y saber si es relevante el cambio.

Esta prueba fue realizada a las afueras de la ciudad de Zaragoza, España, donde se colocó un receptor en la latitud 41.592466 y longitud -0.948032, prácticamente a nivel de suelo, y un transmisor en la latitud 41.530340 y longitud -0.954572, sobre una colina. Entre estos dos puntos geográficos existe una separación de aproximadamente 7 km de distancia y una diferencia de elevación de 300 metros, como se muestra en la Figura 26.

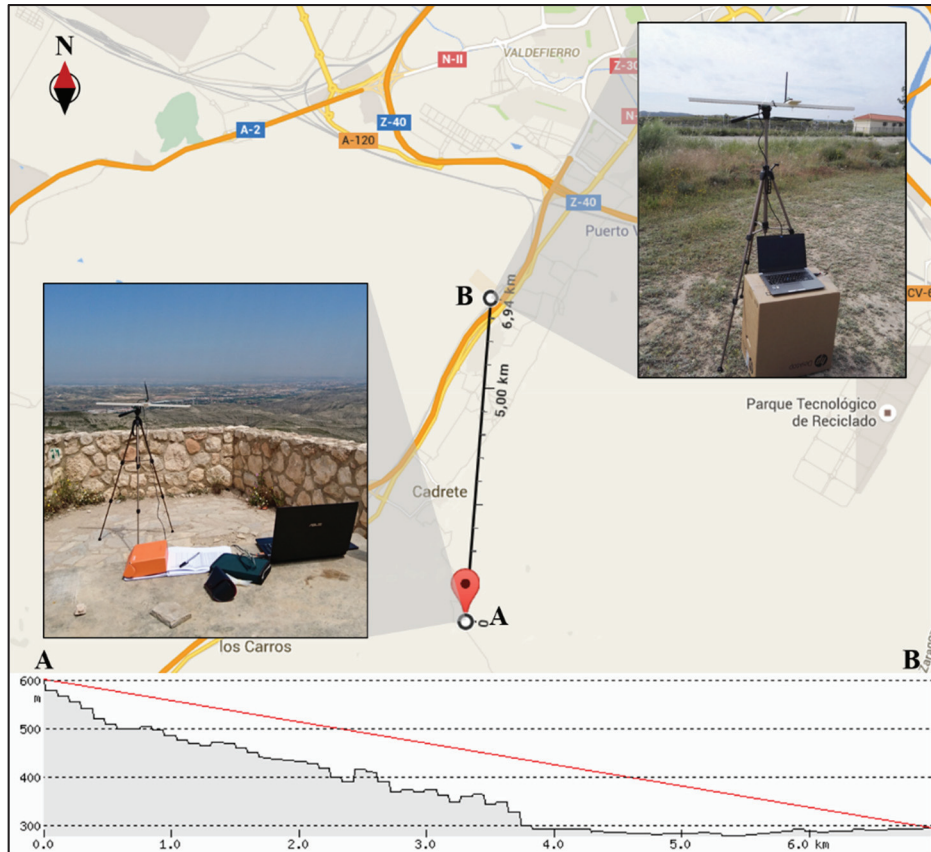


Figura 26 – Distancia entre los dos puntos de prueba y su perfil topográfico. El punto A representa la ubicación del transmisor en altura y el punto B la localización del receptor a nivel de suelo.

En ambos casos, los módulos fueron configurados con un ordenador a través del puerto de conexión serie, el cual también fungió como monitor para los datos en transmisión y recepción. En esta prueba se realizaron una serie de transmisiones sistemáticas, en los que se enviaron datos con identificadores únicos y secuenciales para poder verificar posibles errores de transmisión e información transmitida por otros dispositivos. Para cada paquete de datos recibido se analizó la integridad de estos mismo y el RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), el cual es un indicador de potencia en una señal de radiofrecuencia y tiene una escala de +dBm a -dBm, donde entre más negativo sea el valor, mayor pérdida de señal existirá.

Para las transmisiones realizadas, se optó solo por variar los parámetros de *spreading factor* y *bandwidth*, manteniendo el *coding rate* en su configuración más alta para minimizar la interferencia de radio. La razón de esto es porque los dos primero parámetros son los que tienen una influencia sobre la sensibilidad de recepción, de acuerdo

a la teoría (Semtech-Corporation, 2013). En estas pruebas se cuantificó los paquetes recibidos con éxito, los paquetes recibidos con errores, la razón de paquetes con errores (PER, *Packet Error Rate*) y la razón de paquetes perdidos por error (PELR, *Packet Error Loss Rate*), además del RSSI promedio. Posteriormente se calculó la sensibilidad del receptor, el cual es un parámetro que indica la potencia mínima (dBm) teórica que debe tener una señal para su recepción. Teniendo el RSSI y la sensibilidad del receptor, es posible estimar la calidad de la señal y la holgura que se tiene en rango de transmisión.

En estos ensayos se importante resaltar que solo se utilizó la mitad de los *spreading factors*, para poder así apreciar cambios mucho más notorios en una distancia de transmisión relativamente cercana para el protocolo. Los *spreading factors* utilizados fueron los de SF12 (4096 chips/symbol), SF10 (1024 chips/symbol) y SF8 (256 chips/symbol) y los resultados de estas pruebas, tanto para 868 MHz y 433 MHz, se muestran en la Figura 27 y las Tabla 7 - Tabla 9. Cabe notar que se realizó un cuarto experimento, con un *spreading factor* de 64 chips/symbol (SF6). Sin embargo, los resultados de estas pruebas fueron una pérdida total en la gran mayoría de paquetes para ambas frecuencias, por lo que se decidió no mostrar el ensayo a falta de comparabilidad.

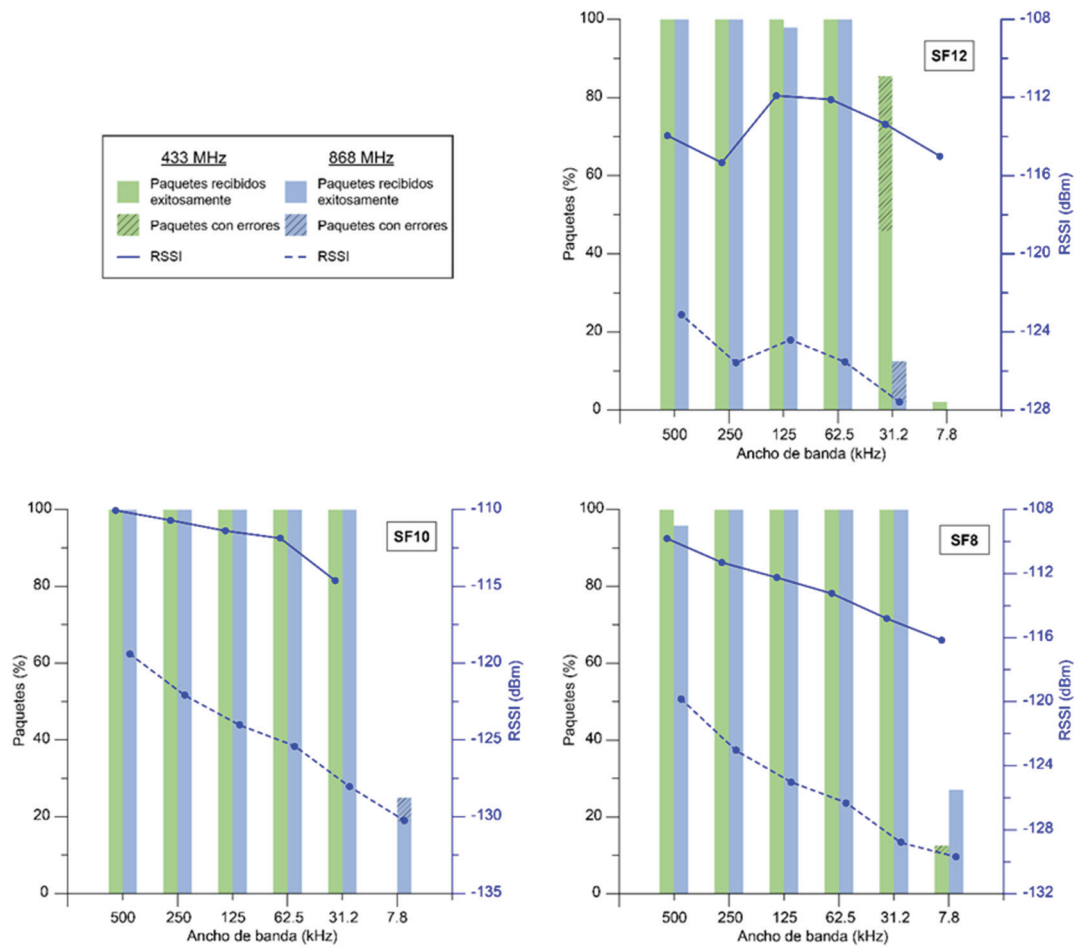


Figura 27 - Gráficas resultantes de cada prueba para los distintos spreading factors. Para los casos donde hubo pérdida total de paquetes, no se muestra el RSSI.

Tabla 7 – Porcentajes de PER y PELR para el SF12 de LoRa.

BW (kHz)	Frecuencia (MHz)	RSSI (dBm)	Sensibilidad del receptor (dBm)	Paquetes recibidos %	PER %	PELR %
500	433	-113,95	-132	100,00%	0,00%	0,00%
250	433	-115,34	-135	100,00%	0,00%	0,00%
125	433	-111,91	-138	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	433	-112,10	-141	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	433	-113,36	-144,1	85,42%	46,34%	14,58%
7,8	433	-115,00	-150,1	2,08%	0,00%	97,92%
500	868	-123,12	-131	100,00%	0,00%	0,00%
250	868	-125,58	-134	100,00%	0,00%	0,00%
125	868	-124,40	-137	97,92%	0,00%	2,08%
62,5	868	-125,54	-140	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	868	-127,59	-143,1	12,50%	83,33%	87,50%
7,8	868	0,00	-149,1	0,00%	0,00%	100,00%

Tabla 8 - Porcentajes de PER y PELR para el SF10 de LoRa.

BW (kHz)	Frecuencia (MHz)	RSSI (dBm)	Sensibilidad del receptor (dBm)	Paquetes recibidos %	PER %	PELR %
500	433	-110,06	-127	100,00%	0,00%	0,00%
250	433	-110,70	-130	100,00%	0,00%	0,00%
125	433	-111,39	-133	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	433	-111,87	-136	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	433	-114,63	-139,4	100,00%	0,00%	0,00%
7,8	433	0	-145,6	0,00%	0,00%	100,00%
500	868	-119,41	-126	100,00%	0,00%	0,00%
250	868	-122,1	-129	100,00%	0,00%	0,00%
125	868	-124,04	-132	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	868	-125,39	-135	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	868	-128,04	-138,4	100,00%	0,00%	0,00%
7,8	868	-130,25	-144,6	25,00%	25,00%	75,00%

Tabla 9 - Porcentajes de PER y PELR para el SF8 de LoRa.

BW (kHz)	Frecuencia (MHz)	RSSI (dBm)	Sensibilidad del receptor (dBm)	Paquetes recibidos %	PER %	PELR %
500	433	-109,81	-121	100,00%	0,00%	0,00%
250	433	-111,31	-124	100,00%	0,00%	0,00%
125	433	-112,25	-127	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	433	-113,25	-130	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	433	-114,81	-133,8	100,00%	0,00%	0,00%
7,8	433	-116,16	-140,3	12,50%	16,67%	87,50%
500	868	-119,84	-120	95,83%	0,00%	4,17%
250	868	-123,06	-123	100,00%	0,00%	0,00%
125	868	-125,02	-126	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	868	-126,31	-129	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	868	-128,81	-132,8	100,00%	0,00%	0,00%
7,8	868	-129,69	-139,3	27,08%	0,00%	72,92%

Con la información provista en este experimento se pueden extraer diversas conclusiones, lo primero, y fundamental, es que a 433 MHz se tiene un RSSI mayor que en 868 MHz en la mayoría de los casos, con la excepción de los escenarios de pérdida total de paquetes donde esa información es inexistente. De manera generalizada, en la Figura 27

se puede notar que entre las transmisiones de 433 MHz y 868 MHz en promedio existe una diferencia de -10 dBm, lo cual es muy significativo. Además, se puede notar la diferencia de potencia de señal que existe entre el RSSI y la sensibilidad del receptor, sobre todo en los casos de SF12 y SF10 donde el margen es mucho más amplio que en SF8. Esta notable diferencia de potencia en la señal indica que el receptor es capaz de recibir transmisiones a mayores distancias, dado que puede recibir señales de mucha menor potencia. También se observa que el *spreading factor* tiene una mayor influencia sobre la sensibilidad del receptor que el *bandwidth*, lo cual tiene sentido dado que es una modulación de tipo espectro ensanchado.

Por último, como se aprecia en las Tabla 7 - Tabla 9, existe un mayor porcentaje de PER y PELR en las transmisiones de menor *bandwidth* para todos los *spreading factors* y en ambas frecuencias de operación. De acuerdo a la teoría y viendo la sensibilidad de receptor en las tablas, sería posible asumir que en configuraciones de SF bajo y BW reducido se podría lograr obtener los mismos o mejores resultados que en configuraciones de SF y BW mayor, como se puede ver en la sensibilidad SF10-BW125 y SF8-BW7.8 en las Tablas 2 y 3. Sin embargo, reducir el ancho de banda de la transmisión hace que ésta sea más propensa a ruido en el canal. Es posible que, debido a la ubicación física del receptor, existieran señales que pudieran afectar a las pruebas en el ambiente. Otra posible causa de estas pérdidas es que no se estaban cumpliendo con las condiciones de Fresnel (Aref and Sikora, 2014), las cuales indican que entre receptor y transmisor existe una altura mínima que ambos deben cumplir, dependiendo de la distancia a la que se desea transmitir, y que a esa altura deberá haber línea de vista con obstrucciones mínimas para poder garantizar la integridad de la señal (Figura 28).

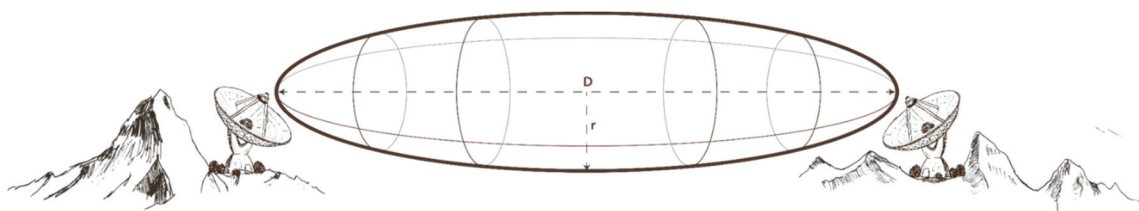


Figura 28 – Zona Fresnel mínima, o primera zona de Fresnel, que debe existir entre dos transceivers. La letra "D" representa la distancia entre los dos transmisores y la letra "r" es el radio de la primera zona Fresnel, la cual debe de estar libre de obstrucciones mínimo en un 60% para garantizar una conexión estable.

Dados los resultados obtenidos, se concluyó que la frecuencia de 433 MHz presenta beneficios considerables que pueden ser útiles para el proyecto SIMMA. Además, como se muestra en las tablas, el SF10 parece ser la mejor opción de configuración ya que fue el que presentó mayor integridad de transmisión en todas las pruebas.

4.4.2 Ensayos de consumo energético

Utilizando el mismo módulo RN2483 probado en los ensayos anteriores, se buscó realizar diversas pruebas para extraer la energía utilizada por el módulo en transmisión y comprender la influencia que tienen los parámetros de configuración sobre este consumo. Para estos ensayos solo se utilizó la frecuencia de operación de 433 MHz, ya que en la sección anterior se mostró con los mejores resultados.

Como primer acercamiento se realizó un análisis del tipo teórico, donde se utilizaron dos fórmulas, extraídas de los documentos técnicos de LoRa (Semtech, 2013; Semtech-Corporation, 2013), para calcular algunos parámetros teóricos necesarios.

$$T_{packet} = (n_{preamble} + 4.25) \left(\frac{2^{SF}}{BW} \right) + (8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right), 0 \right)) \left(\frac{2^{SF}}{BW} \right) \quad (3)$$

La fórmula 1 se utiliza para calcular el tiempo de transmisión de los paquetes, o tiempo en aire, donde $n_{preamble}$ (Semtech, 2013) representa el número de símbolos programados en el preámbulo, H equivale a 1 cuando se habilitan las cabeceras explícitas y 0 cuando se deshabilita, DE vale 1 cuando se habilita la optimización de datos y 0 cuando se deshabilita; y PL representa el número de bytes. Esta fórmula es una modificación a la original que se adecua de manera específica para la configuración de paquetes mencionada previamente. Pudiendo extraer el tiempo en aire y, previamente calculando la potencia de transmisión (Watts), es posible calcular la energía consumida en una transmisión.

$$BR = SF \left(\frac{BW}{2^{SF}} \right) CR \quad (4)$$

La fórmula 2 se usa para extraer el *bitrate* teórico, es decir, la tasa de transferencia de datos y, por último, con las herramientas de diseño de LoRa, se extrae la sensibilidad del receptor. Con estas fórmulas y parámetros, se calcularon los datos teóricos para diversas configuraciones de SF , BW y CR , con un *payload* fijo de 6 bytes. Cabe mencionar que para todos los ensayos se usó el preámbulo programado de 12 símbolos que se utiliza por defecto. La variación en el preámbulo influye en la energía consumida de manera directa, a mayor número de símbolos en el preámbulo mayor la energía consumida y viceversa, debido al tiempo de sincronización que le toma al receptor al recibir un mensaje.

Extraídos los datos teóricos, se procedió a medir en el emisor la energía consumida en una transmisión con el *payload* previamente definido. Además, se extrajo la corriente consumida en la transmisión por periodo para poder analizar la demanda energética de esta etapa. Estas mediciones fueron hechas utilizando una resistencia de *shunt* y la técnica de medición *high side* en la carga, registrando los datos con un NI USB-60009 (National

Instruments, 2019b) y una interfaz personalizada en LABView (National Instruments, 2019a). Con los datos obtenidos, se calculó que en promedio el emisor consume de 30 a 32 mA a 3.0 V.

Para la primera prueba de este artículo, el prototipo A se programó para que periódicamente realizara transmisiones con un *spreading factor* de 4096 (SF12), 1024 (SF10) y 256 (SF8) chips/símbolo y varios *bandwidth*, manteniendo el *coding rate* a su valor mínimo de 4/5. Las configuraciones de SF y BW usadas fueron seleccionadas buscando mantener una alta sensibilidad del receptor. En cada transmisión se midió la corriente, el voltaje y el tiempo para calcular la energía promedio (Tabla 10).

Tabla 10 – Comparativa energética teórica y práctica para las transmisiones LoRa en 433 MHz.

SF	BW (kHz)	Energía de Tx (mJ)	Energía teórica Tx (mJ)	Sensibilidad del receptor teórica (dBm)	Bitrate teórico (bps)
12	500	22.11	23.89	-132	1171.88
12	250	40.81	47.78	-135	585.94
12	125	101.94	95.56	-138	292.97
12	62,5	202.72	191.13	-141	146.48
12	31,2	404.83	382.26	-144.1	73.24
12	7,8	1622.04	1531.47	-150.1	18.28
10	500	6.421	5.97	-127	3906.25
10	250	12.70	11.95	-130	1953.13
10	125	25.34	23.89	-133	976.56
10	62,5	50.68	47.78	-136	488.28
10	31,2	100.81	95.56	-139.4	244.14
10	7,8	395.63	382.87	-145.6	60.94
8	500	1.50	1.49	-121	125000
8	250	3.07	2.99	-124	6250
8	125	3.09	5.97	-127	3125
8	62,5	12.89	11.95	-130	1562.5
8	31,2	25.44	23.89	-133.8	781.25
8	7,8	120.33	95.72	-140.3	195

En la Tabla 10 se puede notar que cuando se incrementa el *bitrate* la energía utilizada se reduce; un comportamiento particular a esta modulación. En LoRa, el *bandwidth*, el cual influye directamente en el *bitrate*, tiene una razón de conversión de 1:1 con los chips por segundo, o *chip rate* (e. j. 500 kHz = 500 kbps). Esto significa que, al incrementar el ancho de banda, lo cual provee un mayor *bitrate*, los datos son modulados y transmitidos de una manera más rápida. Dado que la energía es directamente proporcional al tiempo y la amplitud es fija, se puede decir que el *bandwidth/bitrate* es inversamente proporcional a la energía de transmisión.

Con los datos obtenidos en la Tabla 10 es posible seleccionar una configuración que se adecúe a las necesidades de diversos proyectos. Para el caso específico del proyecto SIMMA, el interés principal es el de transmitir datos a grandes distancias, por lo que se busca una sensibilidad de receptor alta. No obstante, esto conlleva un costo, ya que cuanto mayor sea la sensibilidad del receptor mayor será la energía necesaria, reduciéndose la tasa

de transferencia, lo cual podría no ser deseable. En cambio, si se busca incrementar el *bitrate*, es posible seleccionar una configuración con menor sensibilidad del receptor, limitando el rango máximo de transmisión.

De la tabla anterior se seleccionaron dos configuraciones de RF: 1) SF10 y BW de 125 kHz, la cual es probablemente la más balanceada en cuanto a energía, sensibilidad del receptor y *bitrate*; y 2) SF12 y BW de 125 kHz, donde se incrementa notablemente la sensibilidad del receptor, a costa de reducir la tasa de transferencia y tener un mayor consumo energético. Con estas dos configuraciones, en los siguientes experimentos, se analizó el impacto que tiene el número de bytes transmitidos por mensaje.

Dado que en los paquetes a transmitirse tienen 12 símbolos de preámbulo programado, existe una cantidad mínima de energía requerida para cualquier comunicación LoRa. Para calcular la energía efectiva usada para transmitir el *payload*, se divide la energía de transmisión entre el número de bytes enviados y se resta la energía utilizada por los bytes del preámbulo, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 – Energía consumida por las transmisiones LoRa en 433 MHz con diferente *payload* (BW = 125 kHz).

SF	Bytes de área de datos.	Energía efectiva (%)	Energía de Tx (mJ)	Energía teórica de Tx (mJ)
12	6	75.00	99.20	95.56
12	10	83.33	101.94	95.56
12	20	90.91	130.32	133.41
12	40	95.24	198.18	190.18
12	100	98.04	391.67	379.42
10	6	75.00	25.341	23.89
10	10	83.33	30.62	28.62
10	20	90.91	39.19	38.08
10	40	95.24	54.91	57.01
10	100	98.04	102.54	113.78

Como se esperaba, al aumentar el número de bytes enviados se incrementó la cantidad de energía consumida por el nodo, sin embargo, el impacto de la energía consumida por los bytes de preámbulo se reduce en transmisiones con *payload* alto. Cabe notar que es posible reducir los bytes del preámbulo a 6 símbolos, lo cual reduciría aún más el impacto energético del mismo.

La siguiente prueba consiste en variar el CR, el cual aumenta el tiempo de procesamiento en la transmisión, lo cual implica que habrá un incremento de energía consumida gasto computacional adicional. Con las dos configuraciones seleccionadas previamente, y el mismo *payload* de 6 bytes, se extrajo la energía utilizada para transmisiones con *coding rate* de 4/5 (CR1), 4/6 (CR2), 4/7 (CR3) y 4/8 (CR4) y se comparó con los cálculos teóricos (Tabla 12).

Tabla 12 – Variación del CR en las transmisiones LoRa en 433 MHz (BW = 125 kHz).

SF	CR	Bitrate teórico (bps)	Energía de Tx (mJ)	Energía teórica de Tx (mJ)
12	1	292.97	101.94	95.56
12	2	244,14	112.14	99.35
12	3	209.26	118.78	103.13
12	4	183.11	125.54	106.92
10	1	976.56	25.34	23.89
10	2	813.80	27.95	24.84
10	3	697.54	29.50	25.78
10	4	610.35	31.23	26.73

Como se muestra en la tabla anterior, sí existe un ligero incremento en la energía consumida al incrementar el CR, aunque es casi despreciable si se compara al impacto que tiene la variación del SF. El beneficio principal de aumentar el CR es que provee mayor robustez a la señal transmitida a costa de reducir el *bitrate*, puesto que se aumenta la redundancia en las transmisiones. Sin embargo, esta reducción de *bitrate* es fácilmente calculable, ya que el incremento del valor del CR es equivalente a un porcentaje fijo de reducción de *bitrate*. Por ejemplo, si se comparan los valores de SF12, existe una reducción del 37.5% en *bitrate* entre CR1 y CR4, el cual es el mismo porcentaje para SF10. Esta relación también es aplicable a otros *bandwidth*, por lo que para otras configuraciones se puede calcular de manera sencilla el *bitrate* más adecuado para la aplicación deseada.

4.4.3 Contraste tecnológico de comunicaciones inalámbricas

Como se mostró anteriormente en el estado del arte de este capítulo, los sistemas de monitorización pueden ser muy heterogéneos desde la perspectiva del *hardware* y las actividades que realizan. Debido a esto, es difícil comparar los sistemas por su consumo energético general, ya que la periodicidad del sensado y la cantidad de variables que se miden en estos desarrollos por lo general condicionan a un consumo muy elevado. Sin embargo, es posible realizar una comparativa de los sistemas en base a sus comunicaciones inalámbricas y las prestaciones que ofrecen.

Anteriormente, se realizó un análisis de la modulación LoRa donde se calculó la cantidad de energía requerida para distintas configuraciones de *payload* o parámetros RF LoRa; sin embargo, para poder comparar con los otros sistemas es necesario tener la demanda de corriente del módulo. Este parámetro ya había sido extraído para poder calcular la energía; pero, para efectos de esta comparativa, en la siguiente figura se muestra un extracto del comportamiento del módulo LoRa (Figura 29).

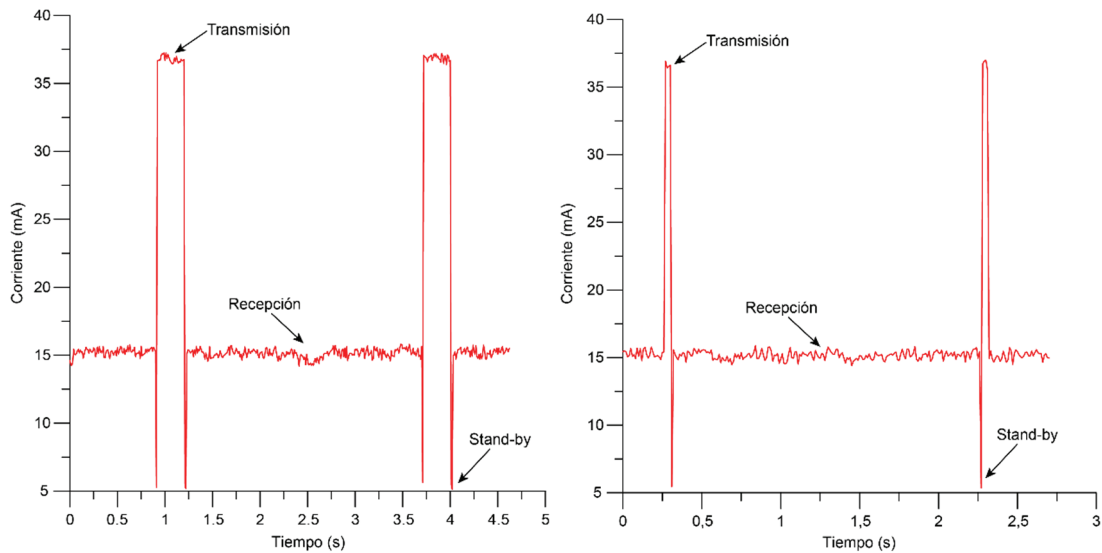


Figura 29 – Consumo de corriente del módulo RN2483 con LoRa en dos configuraciones, SF7/BW125/CR4 (izquierda) y SF7/BW125/CR1 (derecha).

En la Figura 29 se puede apreciar el comportamiento del módulo RN2483 con dos configuraciones de parámetros RF LoRa y el mismo *payload*, haciéndose notar tres de sus estados: transmisión, recepción y su estado transicional *stand-by*; siendo el cuarto estado el de *sleep*. Como se puede ver, el estado de transmisión varía en el tiempo que permanece activo, debido a los parámetros anteriormente mencionados, pero su consumo de corriente se mantiene estable, mientras que el estado de recepción permanece inafectado en ambos aspectos.

Teniendo estos datos de consumo de corriente del módulo de LoRa y conociendo sus capacidades, es posible establecer las diferencias de este desarrollo con respecto a las comunicaciones inalámbricas de los sistemas de monitorización marítimos previamente analizados. Con esto en mente, en la siguiente tabla se muestra esta comparativa (Tabla 13).

Tabla 13 – Comparativa de LoRa con tecnologías de comunicación para sistemas de monitorización marítimos.
*Distancia de transmisión del módulo de comunicaciones al satélite.

Comunicaciones	Voltaje (V)	Consumo en Rx (mA)	Consumo en Tx (mA)	Consumo en sleep (mA)	Rango de transmisión (km)
LoRa	3.0	15.27	36.7	0.042	47
Satelital	5.0	39	145 - 1200	N/A	777*
TinyMesh	3.3	24	560	0.003	0.485
FSK 868	3.3	21	28	5	0.264

Como se muestra en la Tabla 13, la tecnología LoRa presenta uno de los rangos de transmisión de mayor alcance, solo siendo superada por las comunicaciones vía satélite las cuales tienen cobertura prácticamente global. Sin embargo, si se compara la potencia de recepción y transmisión entre estas dos tecnologías, LoRa tiene una respuestas

considerablemente más baja que su contraparte, lo cual permite hacer un uso más eficiente de la energía provista por la fuente de alimentación. Si se compara LoRa con TinyMesh y FSK, en recepción y transmisión se tiene un consumo similar al de FSK pero con una gran diferencia en cuanto al rango de transmisión. Con esto se muestra que con comunicaciones inalámbricas LoRa es posible hacer despliegues de mayor cobertura de área que las implementaciones tipo WSN presentadas previamente. Además, resulta viable hacer monitorizaciones en zonas remotas o de difícil acceso de manera similar a las opciones de vía satelital, con la única limitante de no poder realizar despliegues en mar abierto de manera sencilla.

4.4.4 Pruebas de rango máximo

Con los resultados obtenidos en los ensayos realizados en Zaragoza, donde se hicieron pruebas de transmisión a aproximadamente 7 km de distancia, se tiene una idea del rango que puede tener la modulación LoRa. Sin embargo, para validar la tecnología en un entorno más similar al escenario de SIMMA, se buscó realizar ensayos en un espacio abierto junto al mar, que tuviera buena línea de vista en un área amplia; por lo que se seleccionó la bahía de Cullera en Valencia (España) para la realización de estos ensayos. Dado que se desea evaluar el rango, para estos ensayos se decidió utilizar una configuración de LoRa con un SF12 y BW de 125 kHz debido a su alta sensibilidad de recepción, además de tener un consumo energético y *bitrate* similar al de otras tecnologías. Para el *coding rate* se utilizó una configuración de CR 4/8, la más alta, dado que se desconoce los niveles de interferencia que se pudieran encontrar en este entorno. Al igual que en las primeras pruebas de análisis de LoRa, se utilizó una estructura de paquete con un *payload* único y un código número secuencial para su adecuada identificación y validación en el nodo receptor.

En estos ensayos, el transmisor se colocó aproximadamente 24 metros sobre el nivel del mar, mientras que el receptor se ubicó en 10 sitios distintos, donde se buscó recibir 30 paquetes consecutivos. Para cada caso se calculó el RSSI promedio y el porcentaje de paquetes recibidos correctamente (Tabla 14), además de que se capturó las coordenadas GPS de cada punto (Figura 30).

Tabla 14 – Pruebas de transmisión de largo alcance en la bahía de Cullera, Valencia (España).

Puntos de recepción	Distancia del nodo base al receptor (km)	RSSI promedio (dBm)	Altura sobre el nivel del mar del receptor (m)	Paquetes recibidos correctamente (%)
1	12.42	-122	1	100
2	13.78	-123	2	100
3	16.96	-122	1	100
4	19.20	-121	1	100
5	20.78	-122	1	100
6	22.38	-121	8	100
7	28.58	-119	6	100
8	30.24	-129	7	100

9	28.97	-118	115	100
10	48,23	-116	93	100



Figura 30 – Ubicación geográfica de los distintos puntos de recepción. La letra B representa la posición del nodo base en la ubicación 39.164631, -0.241767.

En la Tabla 14 también se incluyeron los datos de la elevación del receptor en cada punto. Esta información se extrajo posteriormente, utilizando una herramienta topográfica (Heywhatsthat, 2019), y a cada punto se le sumó 1 metro de altura puesto que el receptor se colocó sobre un trípode (Figura 31).



Figura 31 – Estructura sobre la que se colocó el receptor de LoRa.

En las pruebas realizadas en la bahía de Cullera (Tabla 14), se puede ver que en los ensayos del 1-8 las transmisiones se realizaron prácticamente a nivel del mar y esto repercutió en el RSSI, el cual es relativamente bajo. Es muy posible que esto se deba a que no se cumplía con la primera zona de Fresnel, como se mencionó en secciones anteriores. Sin embargo, estas pruebas se realizaron de esta manera para poder probar los límites de la modulación en condiciones poco favorables y similares a las que se pudieran encontrar en México. Aun así, el rango de transmisión obtenido es bastante bueno, alcanzando los 30 km de distancia como se muestra en la Tabla 14. En el punto 8 se realizó una prueba adicional donde el receptor se puso directamente sobre el suelo sin el trípode como base, no obstante, esto provocó una pérdida total de la recepción de paquetes, por lo que no fue agregado a la tabla. Dado este resultado, para los ensayos 9 y 10 se buscó ubicaciones que tuvieran una mayor altura y, a pesar de que estuviesen tierra adentro (Figura 30), este incremento en altura mejoró considerablemente el RSSI de los paquetes. La diferencia es muy notable en el ensayo 10, donde se logró recibir datos a aproximadamente 50 km con un RSSI de -116.73 dBm, una diferencia de -13 dBm comparado con el ensayo 8. De acuerdo con la teoría, con esta configuración es posible tener una sensibilidad de receptor máxima de -138 dBm (Tabla 10), por lo que se puede inferir que es posible transmitir a mayores distancias aún, sin embargo en esta ubicación no se encontraron puntos de recepción accesibles con mayor distancia y conservando la línea de vista.

Considerando los resultados obtenidos en estas pruebas de alcance, es posible teorizar que dichas distancias de transmisión son obtenibles con otras configuraciones como SF10 y BW 125 kHz, donde se tiene una sensibilidad de receptor de -133 dBm (Tabla 10), lo cual es un valor superior al RSSI necesario para la transmisión de mayor rango (Tabla 14). Con un rango tan amplio, es posible cubrir un área de varios kilómetros cuadrados con una topología de estrella simple.

4.5 Arquitectura del Sistema de SIMMA

Para la propuesta de SIMMA se buscó implementar una arquitectura multi-dispositivo para cubrir las distintas necesidades del proyecto, por lo que dos *hardwares* distintos fueron desarrollados con comunicaciones LoRa: el nodo de control y el nodo sensor. Para ambos se desarrolló un *firmware* hecho a medida en el que se incluye el protocolo LoRaNET de capa de red, con el cual se puede utilizar la modulación LoRa. El nodo de control funge como un nodo maestro en la red, montado sobre un UAV, o como un monitor de red en una base en tierra, mientras que el nodo sensor solo puede ser colocado dentro de una de las boyas (Figura 32).

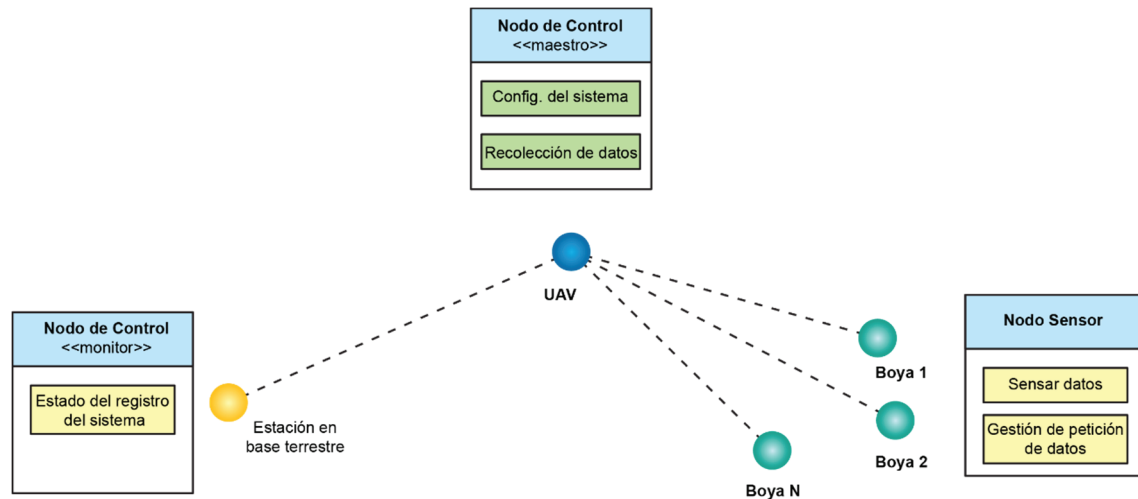


Figura 32 – Funcionalidad general del hardware desarrollado para el proyecto SIMMA

Además, para poder realizar interacciones usuario-maquina con el sistema SIMMA se desarrolló también una interfaz gráfica (GUI, *Graphical User Interface*), simplificando así el proceso de configuración de la red. A su vez, esta misma interfaz puede ser utilizada para visualizar las actividades del sistema cuando un nodo maestro se utiliza como monitor en una estación en tierra.

Dada la complejidad del sistema y para poder detallar en profundidad la funcionalidad completa del sistema, a continuación, se ahondará en cada una de las partes que conforma la propuesta SIMMA.

4.5.1 Protocolo LoRaNET¹

LoRaNET es una implementación propietaria de la capa de red diseñada específicamente para redes de sensores inalámbricos de ultra bajo consumo, donde la necesidad de sincronización y el ancho de banda no son muy elevados. El protocolo es capaz de implementar una topología de red tipo estrella y define dos tipos de nodos:

- Nodo maestro: Encargado de crear y manejar la red, asignando direcciones de red a otros nodos y centralizando el tráfico de mensajes.
- Nodo esclavo: Cualquier otro nodo que conforme la red.

Cada vez que se crea una red LoRa, se establecen una serie de parámetros básicos para el funcionamiento de la misma. Dentro de estos parámetros se encuentra el identificador (ID) de red, el tiempo de espera máximo para una respuesta dentro de la red, el tiempo de espera máximo para que un nodo abandone la red después del último mensaje recibido y el número de intentos que se pueden realizar para reenviar un mensaje, en caso de no recibir un mensaje de reconocimiento (ACK). Todos estos parámetros deben de ser

¹ Rol de participación: el autor de la tesis contribuyó al trabajo presentado en esta sección, sin embargo, este fue realizado por el grupo HOWLab.

ajustados de acuerdo a la configuración de RF de LoRa (SF, BW y CR), dado que estos modifican el rango de transmisión y esto genera grandes variaciones en el tiempo en aire de los mensajes.

Una vez creada la red, el nodo maestro puede reclutar a cualquier nodo esclavo que se encuentre dentro de su alcance, siempre y cuando éste no forme parte de otra red activa. Si un mensaje puede ser respondido por varios esclavos de manera simultánea, como es el caso del proceso de reclutamiento, escaneo de red u otros mensajes de tipo *broadcast*, los mensajes son respondidos por los esclavos en intervalos pseudoaleatorios para reducir la posibilidad de colisión de paquetes de radiofrecuencias.

Cuando un esclavo es reclutado, el nodo maestro le asigna un identificador de red único de 2 bytes, el cual está asociado a la dirección MAC del dispositivo. De esta manera, si un nodo esclavo se desconectara por cualquier motivo, en intento de reconexión el nodo maestro le asignaría el mismo ID de red. El nodo maestro tiene reservada la dirección 0x0000 para sí mismo y la dirección 0xFFFF es un identificador utilizado para mensajes de tipo *broadcast*.

A continuación se muestra un resumen de los comandos principales implementados en el protocolo de LoRaNET (Tabla 15).

Tabla 15 – Comandos de dispositivos de red implementados en LoRaNET.

Categoría	Nombre	Descripción
Comandos para nodos que no estén dentro de la red	Reclutamiento	Mensaje utilizado por el nodo maestro para transmitir a los demás nodos que se pueden unir a la red recién creada
	Petición a unirse a la red	Los nodos que reciban el mensaje de reclutamiento puede peticionar el unirse a la red
	Respuesta a unirse a la red	Respuesta dada a los nodos esclavos de un nodo maestro después de una petición de unión de red
	<i>Beacon</i>	Los nodos que no formen parte de una red pueden enviar este mensaje para transmitir su ubicación o datos relevantes.
Comandos asociados a tareas de mantenimiento de red	Ping	Transmite un mensaje de ping al nodo esclavo
	Petición de abandono de red	El nodo maestro peticiona a un nodo esclavo a abandonar la red
	Evento de abandono de red	Mensaje de notificación de que un nodo abandonó la red
	Escaneo de red	El nodo maestro envía una petición de escaneo de red a la dirección 0xFFFF (<i>broadcast</i>), a la cual cualquier nodo en la red debe responder
	Petición de sincronía	El nodo maestro transmite su hora (GPS) a todos los nodos dentro de la red
Comandos asociados a mensajería	MAC ACK	Mensaje enviado como confirmación de recepción de un mensaje
	Mensaje de datos	Mensaje de datos principal, con un <i>payload</i> máximo de 128 bytes

4.5.2 Nodo sensor

El nodo sensor es quizá la parte más crítica de toda la arquitectura del sistema, ya que es el dispositivo que, como su nombre lo sugiere, se encarga de captar todas las variables ambientales. Para este dispositivo se buscó realizar un diseño de bajo consumo electrónico que pudiera operar por semanas a la vez con el uso de baterías de Lítio recargables exclusivamente, aunque estas pudieran ser sustituidas *a posteriori* por otro tipo de fuentes de alimentación. La PCB se diseñó de manera modular, para poder utilizar distintos tipos de sensores o medios de comunicación a futuro, y se realizó a cuatro capas, para así minimizar los posibles problemas de interferencia que pudieran influir sobre los bloques de radiofrecuencia.

Arquitectura del nodo

El nodo sensor es un desarrollo realizado en una PCB hecha a medida que cuenta con un microcontrolador PIC24FJ128GC006 de 16 bits (Microchip, 2019b), el cual se utiliza como unidad central de procesamiento para manejar los periféricos y comunicaciones. La arquitectura de este microcontrolador ofrece varias configuraciones de bajo consumo energético, las cuales pueden ser utilizadas para incrementar la longevidad del dispositivo. Para las comunicaciones inalámbricas, se utilizó el mismo *transceiver* RN2483 usado para el análisis de la modulación LoRa. Además, la PCB tiene integrados una memoria tipo flash de 8 Mbit y un módulo SIM928A para comunicaciones GPS/GSM (SIM Com, 2019) (Figura 33).

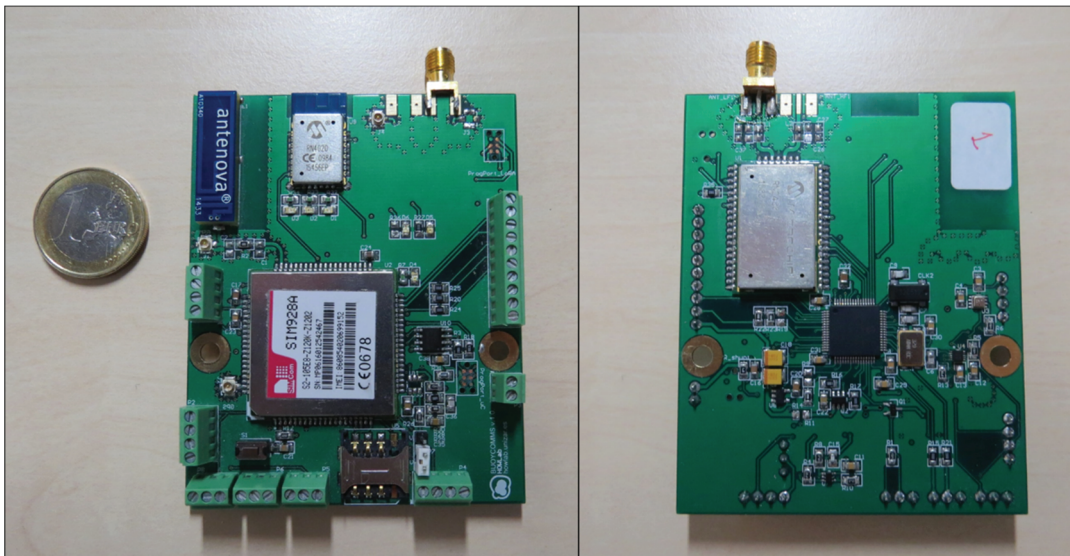


Figura 33 – Diseño de la PCB para las boyas de monitorización ambiental.

Cabe notar que la PCB mostrada en la Figura 33 cuenta con dispositivos adicionales, como un módulo Bluetooth, acelerómetro y puerto para tarjeta SIM para comunicaciones GSM. Estos integrados y módulos, aunque actualmente no se encuentran en uso, fueron

integrados en el diseño para futuros desarrollos y otros posibles escenarios funcionales, preparando así el diseño para posibles funcionalidades adicionales. El diseño completo de la PCB se puede apreciar con mayor detalle en el esquemático presentado en el Anexo II.

Dado que el uso de este desarrollo *hardware* es para monitorización ambiental, los distintos periféricos de comunicaciones (I2C, SPI, UART) y pines analógico/digitales del microcontrolador se conectaron a puertos de conexión en los bordes de la placa. Es en estos puertos donde se conectan los sensores externos como el BME280 (Bosch, 2019), DS18B20 (Cooking hacks, 2019) y el anemómetro 1733 (Adafruit, 2019), para medir temperatura del aire, presión, humedad relativa, temperatura del agua y velocidad del viento (Figura 34)

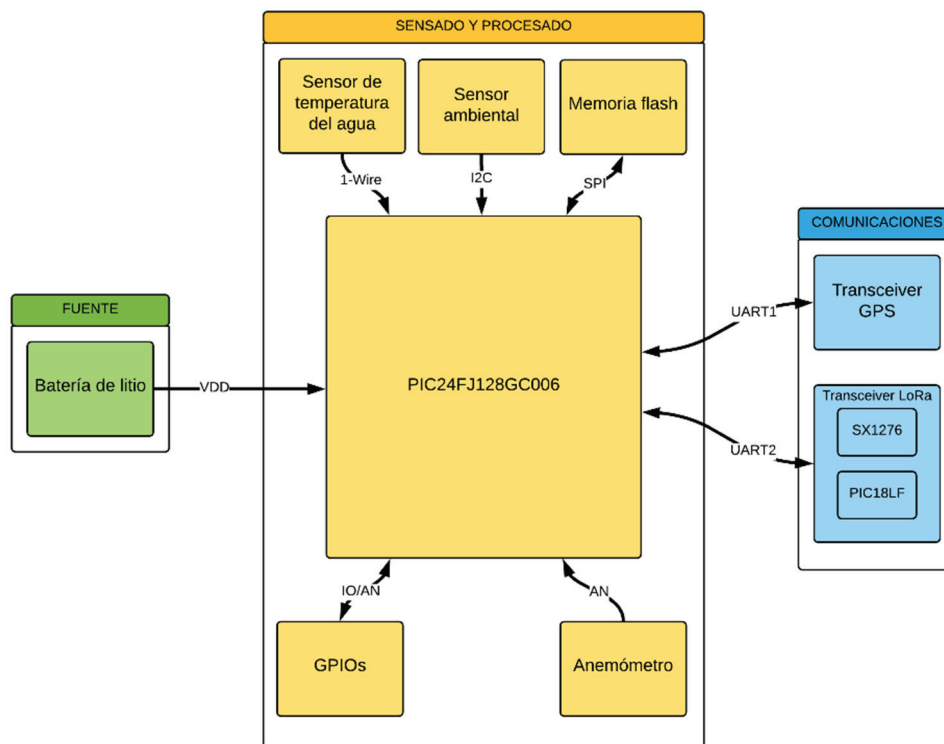


Figura 34 – Diagrama de bloques de las conexiones de periféricos del nodo sensor.

Para poder reducir el consumo de corriente hasta 200 μA y maximizar su longevidad de operación, se utilizaron diversas estrategias de diseño electrónico de bajo consumo, las cuales se enumeran a continuación:

- *Hardware*
 - La alimentación de los sensores BME280 y DS18B20 se encuentra regulada con pines digitales del microcontrolador, pudiendo así desconectar por completo estos dispositivos.

- El módulo de GPS se alimenta directamente de la batería, pero cuenta con un circuito de conmutación MOSFET, a manera de *switch*, para poder apagar el dispositivo si es necesario.
- El anemómetro cuenta con un regulador *step-up* de 12 V externo con un pin de habilitación que permite controlar la activación del regulador y, por ende, la alimentación del anemómetro.
- *Firmware*
 - Los módulos y periféricos de comunicación internos del microcontrolador en desuso se deshabilitaron en el arranque del mismo.
 - Todos los puertos en desuso se deshabilitaron y los pines de E/S digitales fueron configurados como salidas a 0 V.
 - Después de cada ciclo de muestreo, el microcontrolador deshabilita todos sus periféricos y puertos para pasarse al modo de *sleep* hasta la siguiente interrupción para muestreo.
 - El microcontrolador solo se puede despertar a través de una interrupción como puede ser la del RTCC, UART de LoRa o el botón de *reset*.
 - El módulo de LoRa se configura para estar en modo de recepción por un periodo de tiempo definido, a la espera de posibles mensajes entrantes, y posteriormente se cambia a modo *sleep* para ahorro de batería.

Especificaciones funcionales

La funcionalidad del nodo sensor se puede resumir a dos actividades de alto nivel: sensar datos y manejo de peticiones. La primera tarea se puede decir que es la más sencilla de las dos, donde se realizarán tomas de datos de los sensores de manera periódica, de acuerdo a la configuración seleccionada para el nodo. El manejo de peticiones es la tarea que se encarga de gestionar todos los mensajes LoRa entrantes, ya sea de transmisión de datos o para configuración de las actividades del nodo sensor (Figura 35).

El nodo sensor cuenta con dos modos de operación fundamentales, el modo de configuración y el modo de trabajo. En el primero de éstos, como su nombre lo sugiere, el nodo adopta una configuración por defecto (SF7, BW125 y CR1) y permite que el nodo maestro seleccione los parámetros LoRa de RF y la configuración de operación del nodo sensor, a través de mensajes LoRa, del modo de trabajo. Al modificar los parámetros de RF LoRa del nodo sensor, se modifican los registros internos del *transceiver* que almacenan la frecuencia de transmisión, el *spreading factor*, el *bandwidth* y el *coding rate*.

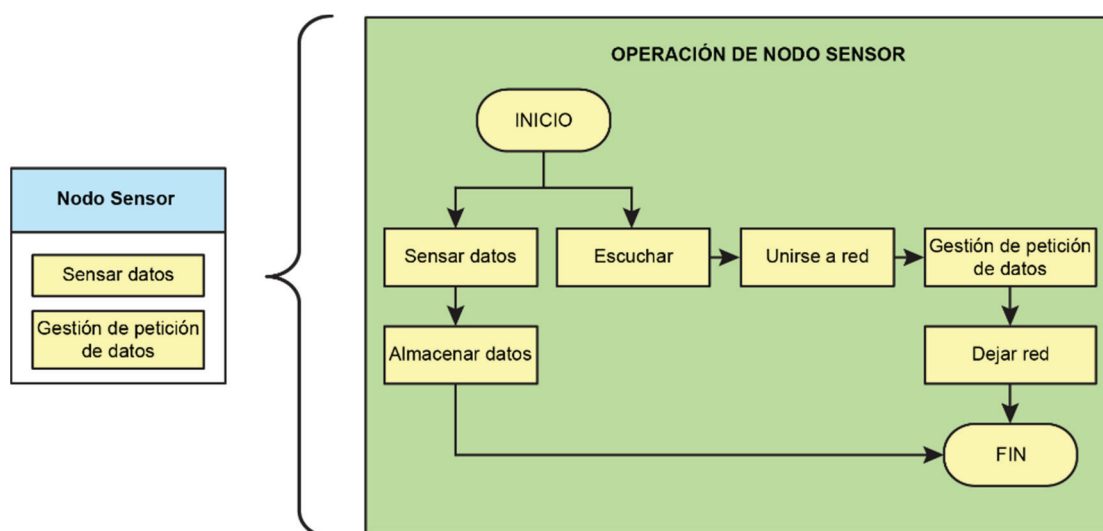


Figura 35 – Diagrama de alto nivel de actividades del nodo sensor.

En cambio, la configuración de operación está ligada al funcionamiento del dispositivo como nodo sensor, por lo que es posible cambiar la frecuencia de captura de datos, el tiempo de activación del mensaje de *beacon* o el periodo de tiempo en que el transmisor de LoRa está activo. Esta última característica se implementó para escenarios donde las boyas estén operando por periodos largos en el mar y la recolección de datos del UAV sea en ciertos intervalos de tiempo, con lo que se produce un ahorro energético considerable ya que el módulo de LoRa presenta un consumo elevado.

Además de cambiar los parámetros de RF y operación, en el modo de configuración es posible realizar peticiones para la descarga de datos, el borrado de la memoria, la solicitud de la última posición GPS conocida, cambiar al modo de trabajo y reestablecer el dispositivo a modo de fábrica. Para poder acceder a este modo es necesario enviar un comando a través del nodo maestro o presionando por 4 segundos el botón físico de *reset*. En el modo de trabajo el nodo sensor opera con los parámetros fijados en el modo de configuración y solo es capaz de comunicarse con el nodo maestro si este se encuentra reclutado en una red creada por el nodo maestro con los mismos parámetros de RF LoRa. En este modo de operación solo se pueden realizar peticiones de descarga de datos, borrado de datos, petición de la ubicación y cambio de modo de operación, cualquier petición para modificar los parámetros de configuración es denegada para evitar problemas de comunicaciones en vuelo.

Puesto que el nodo sensor está pensando para operar por periodos extendidos de tiempo, se implementaron diversos modos de operación de bajo consumo energético, los cuales se ven directamente impactados por la frecuencia de captura de datos. En intervalos de alta frecuencia de captura (1-4 min) el GPS, un integrado de consumo energético elevado, se mantienen encendido para evitar el proceso de búsqueda y conexión a satélites. Cuando la frecuencia de sensado es menor (5+ min), el módulo de GPS se apaga por completo para conservar energía, pero con cada captura es necesario esperar el proceso

de reconexión a los satélites por un tiempo máximo de 1 min; si en este tiempo no se realiza el enlace a los satélites, se guarda una posición GPS fuera de rango (401.6849795, -0.8891495) para denotar este evento.

4.5.3 Nodo de control²

El *hardware* de este dispositivo se basó en la BeagleBone Black (BBB) *board* (BeagleBoard, 2019), la cual porta un microprocesador AM335x ARM Cortex-A8 de 1 GHz, 512 MB de RAM DDR3 y 4 GB de almacenamiento flash eMCC de 8-bits. Se seleccionó la BBB debido a que el nodo de control fungirá como puerta de enlace de la red y requiere una mayor capacidad computacional que la de los nodos sensores. No obstante, este dispositivo no cuenta con las comunicaciones inalámbricas requeridas, por lo que se desarrolló una extensión para la BBB llamada "IoT cape" que integra un módulo RN4020 de Bluetooth (Microchip, 2019d), el ETRX357 de ZigBee (Silicon Labs, 2019) y un SX1276 con LoRa (Semtech, 2019a). Con la adición de la IoT cape a la BBB, se creó un dispositivo inteligente capaz de administrar diversas WSN y enlazarlas al mundo IP a través de su conexión integrada Ethernet (Figura 36).

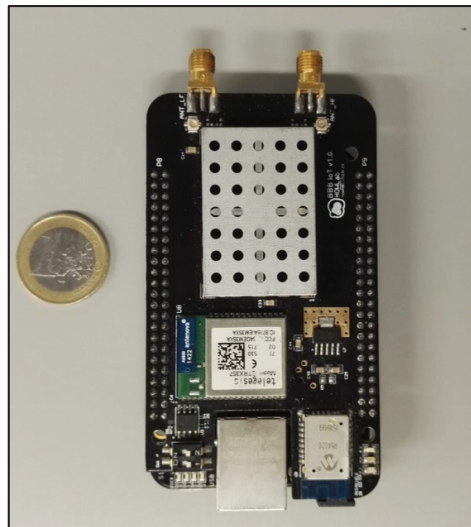


Figura 36 – Nodo de control: BBB y IoT cape.

La programación de éste se llevó a cabo utilizando una metodología modular basada en la iniciativa OSGi (*Open Services Gateway initiative*) (OSGi Alliance, 2019) (Figura 37), la cual define un marco de referencia donde distintas piezas de código son organizadas en paquetes que pueden ser manejados independientemente (ej. instalación, actualización, remover, etc.). Estos paquetes son agentes que pueden dedicarse a tareas especializadas, como el manejo del puerto serial o proveyendo una interfaz de línea de comandos. Además,

² Rol de participación: el autor no contribuyó a la elaboración de este dispositivo, el desarrollo fue realizado por el grupo HOWLab.

son capaces de comunicarse e interactuar entre ellos a través de servicios que son publicados dentro del marco de referencia, los cuales están disponibles para cada paquete.

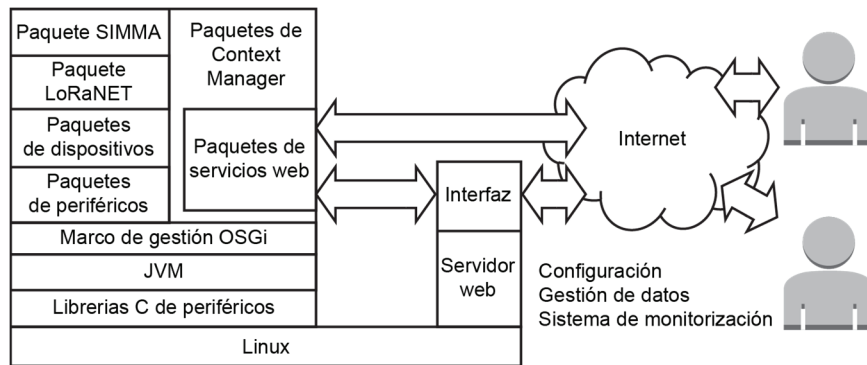


Figura 37 – Arquitectura de software del nodo de control.

Para poder entender mejor la funcionalidad de este dispositivo, dado que se han implementado un gran número de paquetes, a continuación, se hará una descripción general de los paquetes más relevantes:

- Paquetes de periféricos y dispositivos: Habilita el uso de diversos *transceivers* de comunicación presentes en la IoT cape, publicándolos dentro del marco de referencia. Estos paquetes están compuestos por dos capas, la de los periféricos y la de los dispositivos. La primera capa da acceso a los puertos e interfaces de comunicación (GPIOs, UARTs, SPI e I2C) para que puedan ser accesibles desde el marco de referencia. La capa de dispositivos provee métodos para configurar y manipular cada uno de los *transceivers*.
- Paquete LoRaNET: Este paquete implementa capa de red LoRaNET, la cual provee métodos para conectarse o manejar una red existente.
- Paquete Context Manager (CM): Maneja y almacena los datos provenientes de los nodos sensores, garantizando su asignación en la base de datos y el acceso a ellos desde de sistemas externos a través del API RESTful (*Representational State Transfer*) o la plataforma de procesamiento de datos. Esta API ha sido mejorada para poder controlar eventos de configuración y notificaciones de las interfaces remotas (externas al marco de referencia OSGi).

Además, el dispositivo también funciona como una interfaz de usuario que accede a los datos históricos de los nodos sensores, a través del CM, configura el sistema o envía comandos.

Dependiendo del rol que desempeñen, los nodos de control pueden ser configurados como maestros o monitores. Un nodo maestro es responsable de crear y mantener la red, asignando direcciones de red a los otros nodos y centralizando el tráfico de mensajes, teniendo dos tareas principalmente, la de configuración del sistema y la de recolección de datos. Cuando se configura el sistema, el nodo maestro es capaz de cambiar

los parámetros RF de LoRa de la red a crear; mientras que en la recolección de datos se extraen los datos relevantes de los nodos sensores y se almacenan en la memoria interna. Un nodo monitor, en cambio, solo puede funcionar como proveedor de información a los usuarios, con la única tarea de reportar actividades del nodo maestro cuando este se encuentra en el UAV y no es posible interactuar con el directamente (Figura 38).

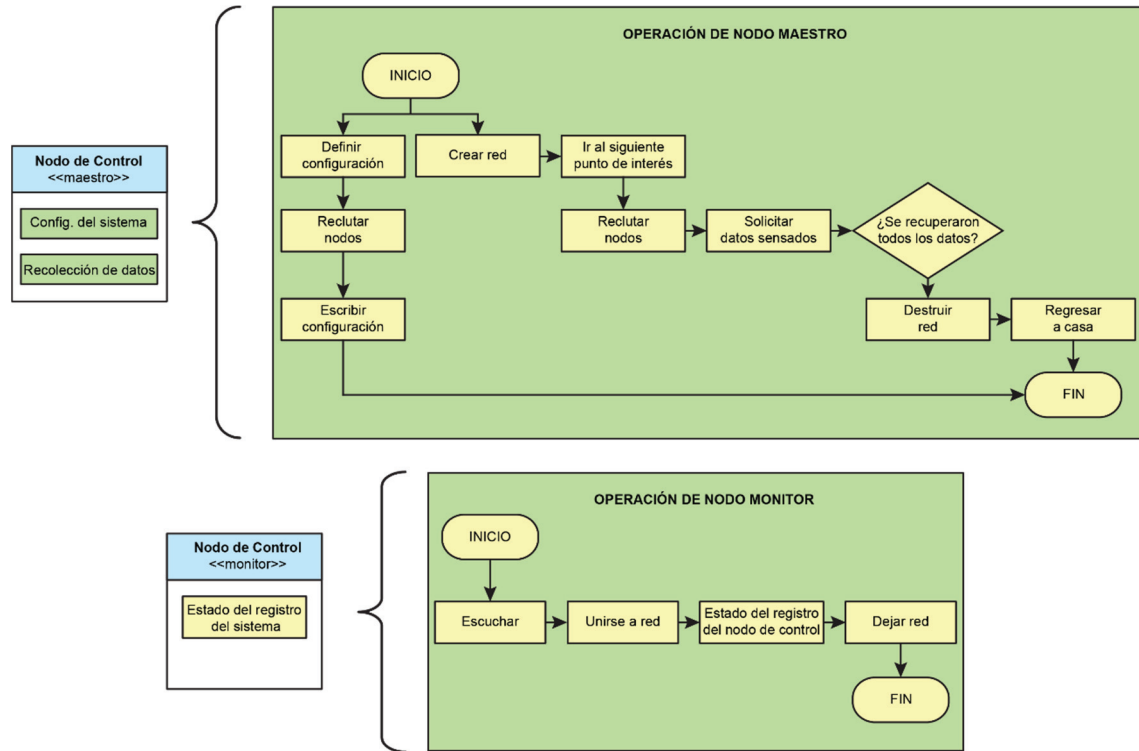


Figura 38 – Diagrama de tareas del nodo de control.

4.5.4 Diseño de la boya

Las boyas se basaron en el diseño de las boyas de arrastre tipo Davis, las cuales tiene una vela submarina en forma de cruz y cuatro dispositivos de flotación. Este tipo de diseño es comúnmente utilizado en la monitorización oceanográfica superficial, puesto que son muy sencillas de utilizar e implementar, además de ser capaces de moverse con las corrientes superficiales (Figura 39).

Para la realización de las boyas, se utilizó una estructura central de PVC hidráulico, hojas de lona plástica para las velas y bolas de poliestireno como flotadores, lo cual lo hace un diseño ligero y económico para grandes despliegues. Estas boyas fueron armadas y desarrolladas por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) de México, los cuales forman parte del proyecto SIMMA.

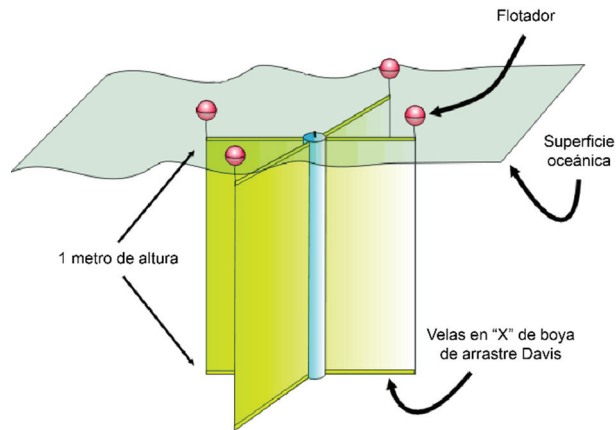


Figura 39 – Diseño de las boyas de arrastre tipo Davis. Imagen modificada de <http://www.ims.uaf.edu/NPRBdrifters>.

En la parte central superior de la boya, se agregó un tubo de PVC adicional para poder alojar la electrónica del nodo sensor y que, a su vez, serviría de base para poder fijar el anemómetro y el sensor BME280. Dado que el sensor BME280 no está preparado para ambientes acuáticos en general, se creó una carcasa impresa en 3D que permite el flujo de aire y evita que el agua entre en contacto con el integrado. Un intercambio apropiado de flujo de aire resulta crítico para que el sensor mida correctamente las variables físicas, ya que entre menos flujo exista mayor será la variación con respecto al ambiente. Cabe notar que esta estructura superior de la boya estará flotando por encima de la superficie del agua, permitiendo el funcionamiento del GPS y las comunicaciones LoRa (Figura 40).



Figura 40 – Estructura central superior de la boya, donde se aloja la electrónica y se fijan los sensores externos.

Dado que esta sección de la boya contiene la electrónica central resulta extremadamente importante evitar que el agua pueda entrar en contacto con ella, por lo que se colocó toda la electrónica dentro de una carcasa IP67 y todos los cables de conexión, para los sensores externos que pasaban a través del PVC, fueron sellados con una resina resistente al agua.

4.5.5 Diseño del UAV

El UAV se basó en un diseño tipo ala delta con una longitud de 2 metros de ala a ala, un marco de poliestireno rígido y una estructura interna de fibra de carbono para reforzar las alas. Este tipo de diseño es ideal para áreas remotas puesto que no requiere una pista de aterrizaje, ya que es capaz de hacer aterrizajes “de panza”, y es lo suficientemente ligero (4.2 kg con batería y electrónica) para ser lanzado con la mano o una pequeña lanzadera portátil (Figura 41).



Figura 41 – UAV tipo ala delta utilizado en el proyecto SIMMA.

El UAV cuenta con un sistema de autopiloto Panda II (FeiyuTech, 2019b) que incluye un módulo receptor de GPS, giróscopo MEMs de tres ejes, acelerómetro de tres ejes, sensor magnético de tres ejes, un sensor de presión barométrica y un medidor de velocidad del viento. Este sistema provee un control de vuelo preciso con tres modos de operación distintos: manual, AFSS activado (estabilización activada) y autopiloto. El autopiloto puede ser controlado y configurado con el uso del software GCS provisto por el fabricante, el cual provee una interfaz gráfica con datos en tiempo real para los distintos parámetros de vuelo del drone y un mapa para la navegación por puntos geo-referenciados. Para enlazar el software GCS con el UAV se utiliza el transmisor inalámbrico de datos FY-605 a 462.125 MHz (FeiyuTech, 2019a), el cual provee un rango de transmisión extendido de hasta 15 km de distancia. Además de esto el UAV tiene un transmisor de video FPV (*First Person View*), con su correspondiente cámara integrada, que opera en la banda de los 900 MHz y un receptor LRS (*Long Range System*) a 455 MHz, los cuales son utilizados para controlar el drone en modo manual con un radio control.

El dron es capaz de mover una carga útil de 600 gramos en total, contando que el mismo ya porta una batería LiPo y los sistemas electrónicos previamente mencionados, por lo que es capaz de volar aproximadamente 40 min con un nodo de control y batería, los cuales tiene un peso aproximado de 360 gramos. Cabe notar que este dispositivo también fue provisto por el CICESE de México.

4.5.6 Interfaz gráfica de usuario³

La GUI es una aplicación web desarrollada con Angular 2 (Angular, 2019) diseñada específicamente para su uso en el proyecto SIMMA como una herramienta de configuración y visualización del sistema. Se buscó utilizar una interfaz de este tipo para evitar la instalación de *software* personalizado en el equipo de cómputo de los usuarios y problemas de compatibilidad entre los distintos sistemas operativos, además de proveer una solución auto-contenida (Figura 42).

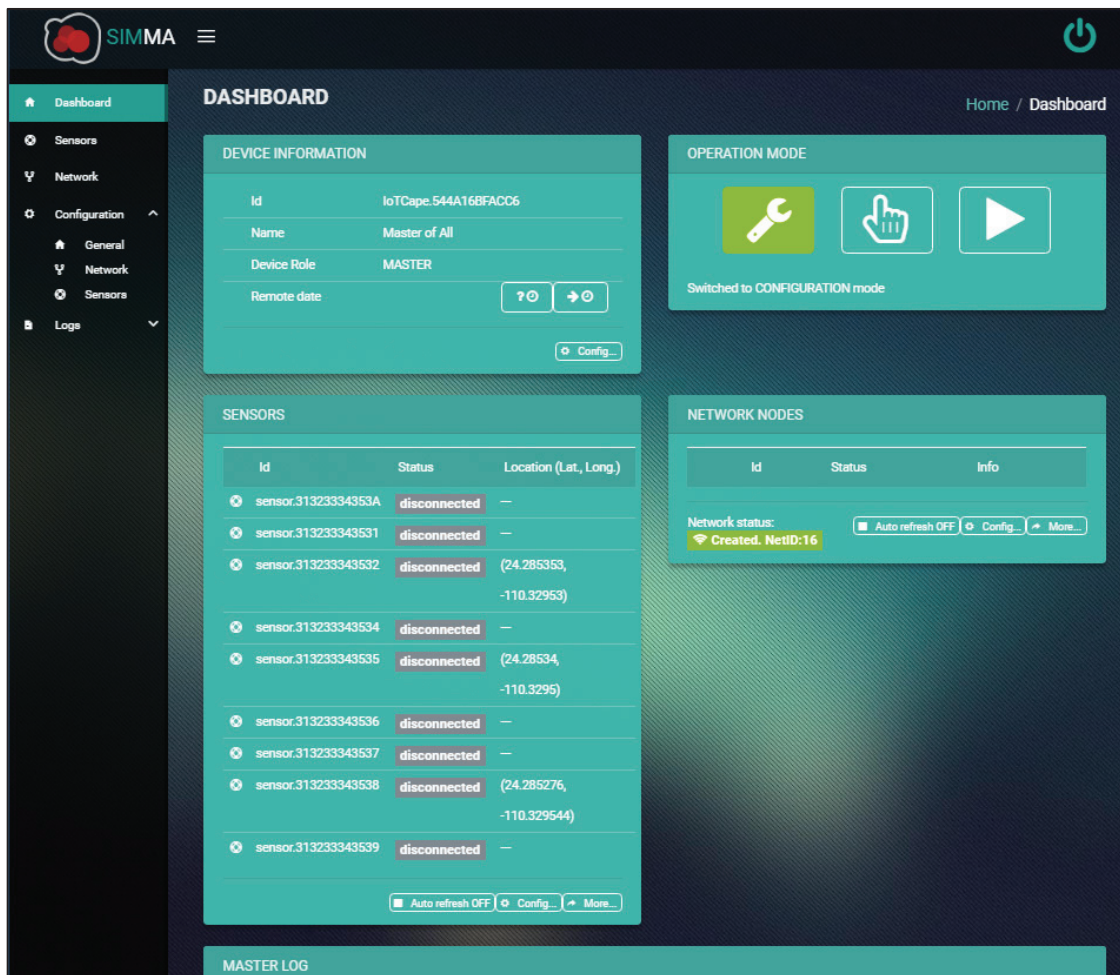


Figura 42 – Fotografía de pantalla de la interfaz de usuario.

³ Rol de participación: el autor de la tesis contribuyó al trabajo presentado en esta sección, sin embargo, este fue realizado por el grupo HOWLab.

Para poder acceder a las características de la interfaz, el nodo de control debe de estar conectado a través de una interfaz de red y, posteriormente, acceder a ella en un explorador web con su dirección IP predefinida. Puesto que la BBB provee conexión a través de una interfaz de Puerto Virtual Ethernet por USB, es posible conectar este dispositivo por puerto serie a cualquier ordenador, lo cual simplifica su uso al usuario.

Habiendo accedido a la interfaz, el usuario es capaz de configurar el nodo de control como maestro o como monitor. En la modalidad maestro, la funcionalidad de la GUI se torna más compleja, puesto que el usuario podrá programar todos los nodos de la red, por medio del nodo maestro. El nodo maestro tiene tres modos de operación: configuración, manual y automático. Como su nombre lo sugiere, el modo de configuración permite al usuario cambiar los parámetros RF LoRa de todos los nodos (maestro, sensores y monitor), y la configuración de operación de los nodos sensores. Este modo siempre debe ser empleado como paso inicial de un despliegue. Posteriormente, en el modo manual el usuario es capaz de manipular, descargar o eliminar los datos de los nodos sensores, además de visualizar gráficamente los datos descargados y poder exportarlos a diversos formatos (xml, json, csv o kml). El modo automático se usa exclusivamente cuando el nodo maestro va a ser montado en un UAV, previo a la configuración del resto de nodos esclavos con los mismos parámetros RF LoRa.

En modalidad monitor, el usuario es capaz de visualizar el historial completo de mensajes de un nodo maestro en tiempo real, incluyendo la ubicación GPS de los nodos sensores, las actividades de la red y el proceso de extracción de datos. Para poder enlazarse con un nodo maestro, el monitor también debe de tener la misma configuración de parámetros RF LoRa que el maestro.

4.6 Pruebas de validación del sistema

En esta sección el enfoque principal será el de comprobar el funcionamiento de cada una de las partes que componen la arquitectura del sistema SIMMA, excepto el diseño del UAV, y sus interacciones. Para lograr este fin, se desarrollaron una serie de pruebas para poder validar cada etapa de manera sistemática e individual, para posteriormente probar el sistema en conjunto. Las pruebas que fueron propuestas son las siguientes:

- Validación en laboratorio de los nodos e interfaz gráfica. Con estas pruebas se pretende hacer una verificación del comportamiento de la WSN LoRa interna en búsqueda de posibles errores de interacción o posibles mejoras para optimizar tiempos de mensajería y de sus modos de operación, con el afán de tener el menor consumo posible para una mayor longevidad del sistema. Además, se verificarán todos los periféricos de los dispositivos y se

buscarán posibles mejoras a la interfaz de usuario para una interacción intuitiva y sencilla.

- Análisis de interacción e interferencia entre las comunicaciones LoRa y el sistema de vuelo del UAV. Esta prueba resulta crítica puesto que es importante verificar que no existan condiciones que fallo en las comunicaciones inalámbricas del sistema, las cuales estarán funcionando a la par. Principalmente se busca evitar condiciones en las cuales se pudiera perder el control del dron y la pérdida de datos en las transmisiones.
- Validación del sistema SIMMA en campo. Tras realizar validar los sistemas en entornos controlados, se realizará una prueba de todo el sistema en un entorno similar al área de estudio objetivo, con lo que se busca revisar el comportamiento de todos los dispositivos en un entorno real de trabajo.

4.6.1 Pruebas de sistema iniciales

Con el *hardware* del nodo de control y nodos sensores descritos anteriormente, diversas pruebas de estrés y estabilidad fueron realizadas en un entorno controlado de laboratorio.

Pruebas de estabilidad de nodo y comunicaciones

Los nodos sensores fueron programados para capturar datos periódicamente del entorno, además de su posición GPS, almacenar estos datos y quedar a escucha de cualquier mensaje LoRaNET entrante. Por otro lado, el nodo de control se configuró como maestro automático para crear una red, buscar y reclutar nodos sensores y descargar sus datos internamente, lo cual fue posible visualizar a través de un ordenador con la GUI. Estas pruebas fueron realizadas por periodos extendidos de tiempo en la búsqueda de errores de codificación, optimización del *firmware* y *software* de los dispositivos en cuestión y calibración de los sensores. Además de esto, se comprobó el correcto funcionamiento del modo de rescate de los nodos sensores, dejándolos por periodos extendidos de tiempo sin ser reclutados hasta superar el umbral especificado de tiempo y que emitieran los mensajes de *beacon* a cualquier nodo maestro con los mismos parámetros RF LoRa.

Posteriormente, se buscó analizar el comportamiento de las comunicaciones LoRa en un entorno similar a las pruebas de campo a realizar, para así poder apreciar las posibles interacciones con los *transceivers* del UAV. Para cumplir con este objetivo, se realizó una primera prueba donde se transmitió una secuencia de paquetes entre dos *transceivers* separados por una masa de agua, con ambos módulos LoRa a nivel de mar. En esta ubicación se probaron diversas configuraciones de parámetros RF LoRa, entre ellas se validó el SF de 128 chips/symbol (SF7) con un BW de 125 kHz (BW125) y un CR de 4/5 (CR1), la cual no había sido verificada previamente en los análisis previos a 433 MHz. El razonamiento

de la validación de esta configuración LoRa en particular, es para poder tener una configuración con un alcance moderado, comparado con los resultados de las pruebas en Cullera, pero una alta tasa de transferencia de datos tanto para descargas en campo como en tierra. Con esta configuración se logró realizar transmisiones con un rango aproximado de 5 km, sin ningún problema de recepción de paquetes.

Prueba de interferencias con el UAV

En la misma ubicación de la prueba pasada, también se buscó verificar el comportamiento de las comunicaciones LoRa con las del UAV, específicamente con el módulo de autopiloto que utiliza la misma banda de operación a 433 MHz. Al igual que en la prueba anterior, paquetes de datos LoRa fueron transmitidos en una masa de agua al mismo tiempo que el transmisor FY-605 emitía datos a un ordenador con el software GCS. Buscando probar el peor de los escenarios, el FY-605 se configuró a la misma frecuencia de operación que LoRa, a pesar de que su funcionamiento normalmente es en la frecuencia de 462.125 MHz. En todo el experimento no fue posible captar ningún tipo de interferencia en la recepción en el ordenador o en las transmisiones LoRa, lo cual indica que es posible la coexistencia de ambos en un mismo entorno.

A pesar del éxito de las pruebas de validación, fue necesario realizar una última prueba con el dron en vuelo. Este experimento se realizó con un nodo sensor puesto en tierra, un monitor de red conectado a un ordenador con la interfaz y un nodo de control, configurado como maestro, dentro del UAV (Figura 43).



Figura 43 – Prueba inicial de vuelo. A la izquierda el nodo sensor puesto en tierra y a la derecha el UAV con el nodo de control colocado dentro.

Tras la verificación de las comunicaciones en tierra, el dron se voló en modo manual en un patrón circular mientras que se solicitaban datos del nodo sensor. Durante la prueba una vez más no fue posible detectar interferencias entre los sistemas de tierra y vuelo, por

lo que se certificó que las comunicaciones del sistema eran capaces de interactuar en conjunto y el sistema podía ser desplegado en el mar.

4.6.2 Prueba de campo

Para esta prueba se buscó realizarla en un ambiente controlado donde se pudiera minimizar posibles pérdidas de los dispositivos en el peor de los casos. Por esta razón y la facilidad de acceso, se seleccionó la playa de El Tecolote en La Paz (México) donde se colocaron tres boyas a 60 metros de la playa (24.33657, -110.32229 UTM) con una separación de un par de metros entre ellas. Las boyas se configuraron para capturar datos ambientales y su posición GPS cada minuto, además de un utilizar los parámetros de SF 128 chips/symbol, BW 125 kHz y un CR de 4/5. La selección de estos parámetros RF LoRa fue hecha para poder realizar descargas rápidas y así poder realizar varios vuelos de descarga en distintas ocasiones (Figura 44).



Figura 44 – Boya Davis colocada en la playa de El Tecolote (México) para captura de datos.

Para poder verificar el enlace entre el UAV y las boyas se utilizó un monitor de red, conectado a una computadora, para poder visualizar los mensajes intercambiados entre ellos en la interfaz. Dada la cercanía del monitor y las boyas, se podía inferir que, si el monitor perdía el enlace con el nodo maestro en el dron, lo mismo ocurriría con las boyas. Pasado un intervalo de tiempo en el cual se permitió que las boyas sensaran datos, el UAV con el nodo maestro fue lanzado desde la playa en modo automático siguiendo puntos geo-referenciados previamente especificados (Figura 45).



Figura 45 – Trayectoria de vuelo de las pruebas en El Tecolote, donde se navegó a 30 metros de altura. El punto más lejano (4) se encuentra a 8.62 km del área de despliegue.

Posterior al lanzamiento del UAV, en el monitor de red era posible visualizar como el nodo maestro periódicamente localizaba las tres boyas y extraía datos de cada una. En la Figura 46 se presenta una muestra de lo extraído.

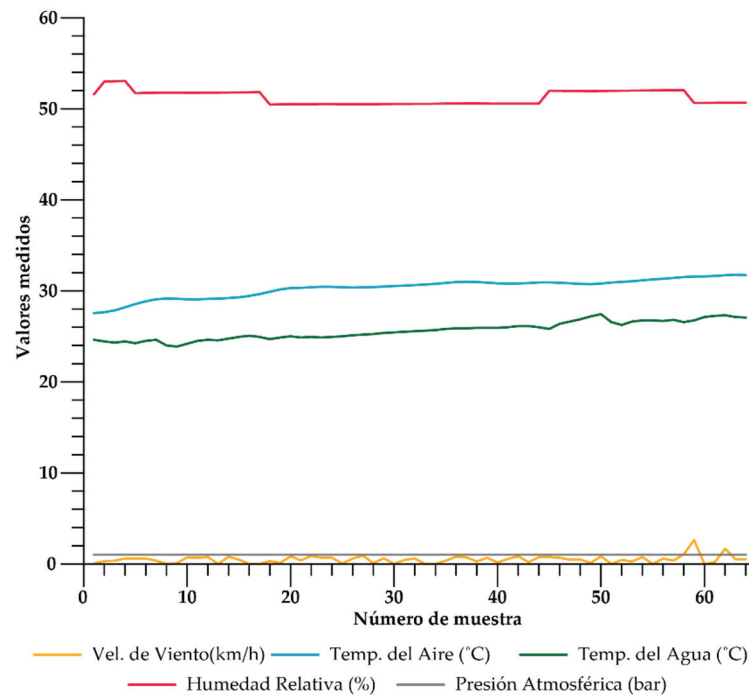


Figura 46 – Datos descargados por el nodo maestro de una de las boyas.

En el transcurso del recorrido del UAV la señal del nodo maestro LoRa se perdió aproximadamente a 4 km de distancia, lo cual resulta razonable ya que en las pruebas de validación se lograron 5 km máximo. Dado que a lo largo de las pruebas se mantuvo una comunicación constante entre el nodo maestro y los sensores, lo cual se visualizó a través del monitor, y fue posible obtener una serie coherente de datos, se puede concluir que el sistema resulta válido para monitorización marina.

4.6.3 Análisis posterior a pruebas

Después de extraer las boyas de la playa cada una fue desensamblada para retirar la electrónica del nodo sensor, lo cual reveló que en una de las boyas tenía un pequeño orificio en la estructura de PVC por el que entró agua. Además de esto, la caja IP67 interna no contaba con una junta tórica por lo que el agua entró en contacto con la electrónica dañándola permanentemente (Figura 47).

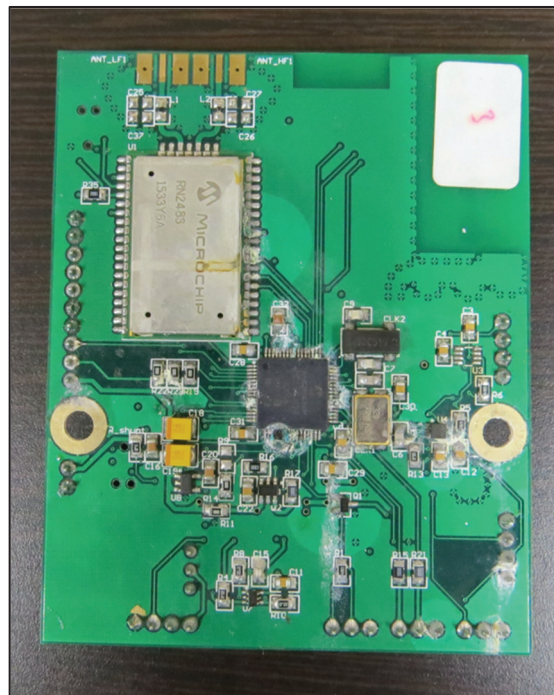


Figura 47 – Daño producido por el agua al nodo sensor.

Este inesperado resultado sugiere que la parte superior de la boya (Figura 40), aunque resultó funcional para la prueba de campo, requiere mejoras para evitar este tipo de eventos. Además, un porcentaje pequeño de las muestras extraídas de los sensores mostraron pérdida de señal de GPS, lo cual se puede explicar analizando la Figura 44, donde se puede notar que parte del nodo sensor se encuentra por debajo de la superficie del mar; es posible que esto provocara una pérdida de señal. Otro punto a resaltar es que, por el ensamblaje de roscado de la estructura superior, se notó una torsión en el cableado de los sensores a la PCB, lo cual a la larga puede dañar las conexiones (Figura 48). Estos

resultados sugieren que es necesario mejorar la flotabilidad de la boya o la ubicación de los módulos de GPS y Lora, además de cambiar el tipo de ensamblaje.



Figura 48 – Diseño y ensamble del primer prototipo contenedor del nodo sensor.

Por otro lado, los datos extraídos de las boyas fueron comparados con los de otro equipo de medición de campo y se encontraron desviaciones relevantes en la temperatura del ambiente y la humedad relativa. Esta desviación no había sido detectada previamente debido a que las pruebas de calibración de los sensores se realizaron en laboratorio, lo cual representa un entorno más cercano al ideal, además de que las condiciones climáticas de la playa del Tecolote resultaron más agresivas al sistema de lo esperado. Para poder lograr los estándares requeridos del proyecto SIMMA, es necesario realizar una re-evaluación de la calibración de los sensores en condiciones ambientales similares y del prototipo contenedor, por lo que en la siguiente se cubrirán estos requerimientos.

4.7 Re-diseño del prototipo

Habiendo identificado estos problemas, se realizó una estancia en CICESE (ULP) para modificar el envase, buscando simplificar su manipulación, mejorar la estanqueidad y favorecer las comunicaciones inalámbricas (GPS y LoRa). Se optó por utilizar un estuche IP67, con apertura vertical, pestillos manuales de presión y protección de golpes (Harderback, 2019). Sobre este se colocó el anemómetro y el sensor ambiental con su caja de protección (Figura 49).



Figura 49 – Estuche con apertura vertical (izquierda) y estuche con sensores montados (derecha).

Este tipo de envase permite colocar la caja del nodo sensor en una ubicación horizontal, en la que las antenas de comunicación LoRa y GPS se encuentran en la posición óptima, además de evitar la torsión de los cables de conexión de los sensores. Adicionalmente, la forma de abrir la caja permite fácilmente realizar cambios de baterías y/o sustitución de los sensores. Para poder conectar los sensores con la electrónica también fue necesario realizar orificios para pasar los cables, los cuales fueron cerrados con un sellador elástico para juntas estructurales para poder preservar la estanqueidad de la caja.

Este nuevo estuche prototipo (prototipo v2), aunque soluciona gran parte de los problemas, conlleva el inconveniente del color del estuche mismo. Debido a que el color negro es capaz de absorber todo el espectro de la luz, esto genera un incremento en la temperatura del estuche lo cual crea un ambiente poco favorable para la electrónica y sensores en general en general. Con esto en mente se procedió a pintar las cajas de color blanco, el cual ayuda a reflejar la luz y reducir el calor absorbido, manteniendo la electrónica en un rango de temperatura más adecuado. Para comprobar la mejora de obtenida, se utilizó la cámara infrarroja FLIR One para dispositivos móviles (FLIR Systems, 2019) para medir la temperatura del prototipo v2 expuesto directamente al sol antes y después del cambio de color (Figura 50).

Como se puede ver en la Figura 50, el cambio de color del estuche redujo la temperatura del mismo por 13 °C, dejando así un rango de temperatura más aceptable para el correcto funcionamiento de la electrónica.

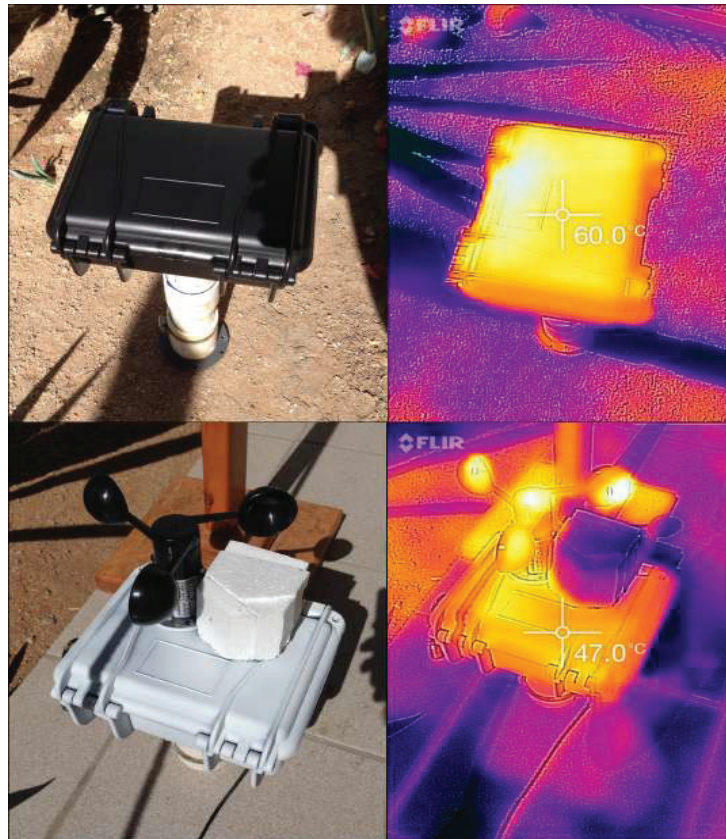


Figura 50 – Medición de temperatura del prototipo v2 antes y después del cambio de color.

Habiendo cambiado la envolvente, se realizó un análisis sobre los datos capturados en la prueba marítima donde se buscaba entender porque existían desviaciones solo en la temperatura del ambiente y en la humedad relativa. Realizando pruebas adicionales en exteriores se concluyó que la desviación se debía al calentamiento de la carcasa de protección del sensor ambiental (BME280), debido a la incidencia directa de los rayos solares, y por falta de un mayor intercambio de aire dentro de la carcasa, lo cual crea bolsas de aire que no representan fielmente los valores del ambiente.

Aunque el sensor BME280 también mide la presión atmosférica, además de las variables mencionadas, estos datos no se vieron afectados ya que se requieren cambios muy drásticos en esta variable física para llegar a notar una diferencia. Para solucionar los problemas encontrados, se incrementó la toma de aire de la carcasa de protección del sensor y se le hicieron orificios de salida, además de que la carcasa se cubrió con poliestireno expandido (EPS), el cual es un aislante térmico altamente eficiente y económico. Con este recubrimiento fue posible reducir la temperatura absorbida por la caja de protección por casi 19 °C, manteniendo la carcasa a una temperatura ambiente estable (Figura 51).

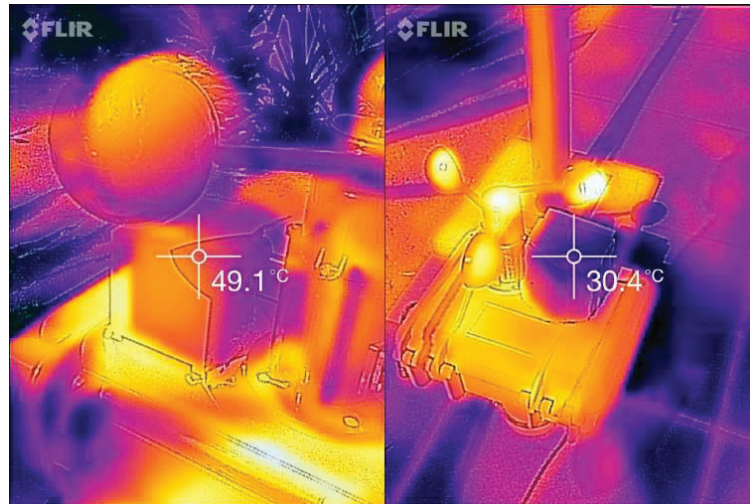


Figura 51 – Medición de temperatura de la caja de protección sin EPS (izquierda) y con EPS (derecha).

4.7.1 Pruebas de re-calibración de los sensores

Las boyas desarrolladas están pensadas para obtener datos ambientales con la misma precisión y calidad que los equipos usualmente utilizados como estaciones meteorológicas, ya sean en ambientes marinos o terrestres. Debido a las variaciones en los valores obtenidos por los sensores en las pruebas de campo, es necesario realizar una segunda calibración de los sensores en condiciones similares a las de las pruebas de campo, posterior a la inclusión del recubrimiento con EPS. Con esto se busca una vez más lograr obtener una respuesta por parte de los sensores lo más cercano y preciso a los valores reales detectados en campo.

Para validar los cambios realizados en la carcasa de protección y los datos de los sensores, durante la estancia en CICESE (ULP), se realizó una comparativa entre los datos obtenidos por las boyas y una estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 (Davis Instruments, 2019), la cual permite extraer la velocidad del viento, temperatura ambiental, presión atmosférica y humedad relativa, al igual que las boyas. Buscando tener la mayor similitud de condiciones atmosféricas, las pruebas fueron realizadas en la ciudad de La Paz (México), la ciudad más cercana a la playa de El Tecolote, donde se colocaron la estación meteorológica y el nodo sensor sobre el techo del CICESE (ULP) y se realizaron mediciones continuas por 96 horas. En esta ubicación en particular se tiene paso libre del viento e incidencia directa solar, sin ningún tipo de sombra que pudiera cambiar las mediciones de uno u otro dispositivo, asemejándose a las condiciones vistas en la playa (Figura 52).



Figura 52 – Estación meteorológica Davis (izquierda) y boya (derecha).

Los resultados de estas pruebas se pueden ver representados en las Figura 53-Figura 56, donde claramente se puede notar la similitud entre las aportaciones del nodo sensor y la estación meteorológica Davis.

Como se puede ver en las Figura 53-Figura 56, los datos obtenidos por la boya son muy similares a los de la estación meteorológica. Existen aún algunas variaciones, siendo la más notable la de temperatura, la cual presenta picos máximos más abruptos con una variación de tres grados Centígrados (Figura 54). Debido a la variabilidad fija encontrada en los máximos de temperatura, se optó por realizar agregar filtros digitales por *software* para normalizar estos incrementos, dado que en la mayor parte de las condiciones de temperatura los resultados obtenidos fueron bastante acertados. En la Figura 56 podemos ver que la velocidad del viento tiene una forma de onda muy similar a la de la estación meteorológica, sin embargo estas parecen diferir visualmente debido a que la estación Davis aproxima cada dato a un múltiplo de 0.4 y el nodo sensor presenta una mayor precisión en cuanto a la toma de valores de esta variable. En cuanto a la presión atmosférica y humedad relativa, los resultados son prácticamente los mismos, con variaciones mínimas que se encuentran dentro del rango de precisión deseados en el proyecto (Figura 53 y Figura 55). Con estos resultados y los ajustes por *software*, los valores adquiridos por los sensores resultan mucho más precisos a las medidas esperadas en campo y, por ende, este segundo prototipo requiere también ser probado en campo para su última validación.

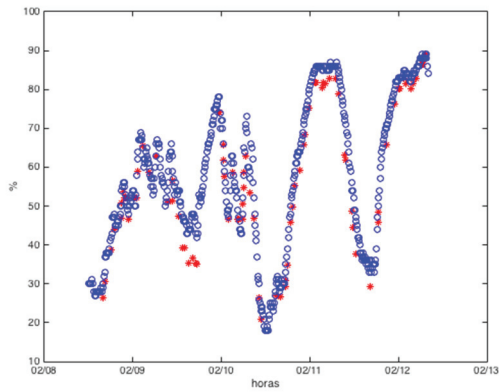


Figura 53 – Comparación de humedad relativa entre estación meteorológica (azul) y boya (rojo).

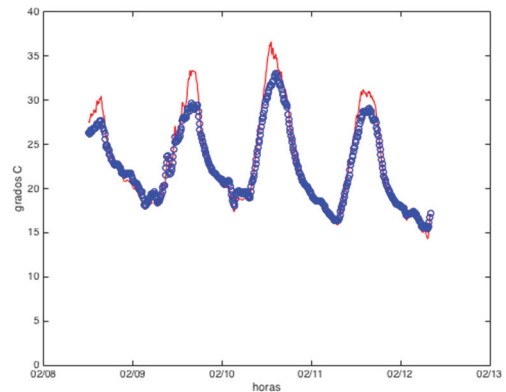


Figura 54 - Comparación de temperatura entre estación meteorológica (azul) y boya (rojo).

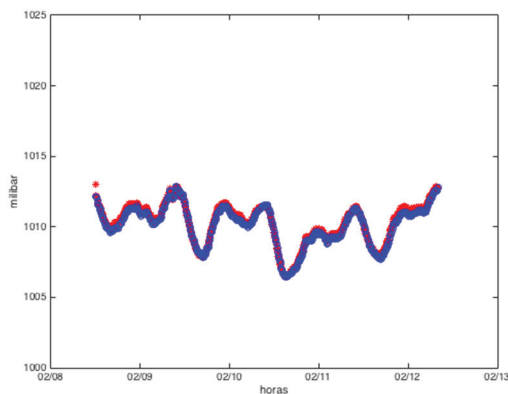


Figura 55 - Comparación de presión atmosférica entre estación meteorológica (azul) y boya (rojo).

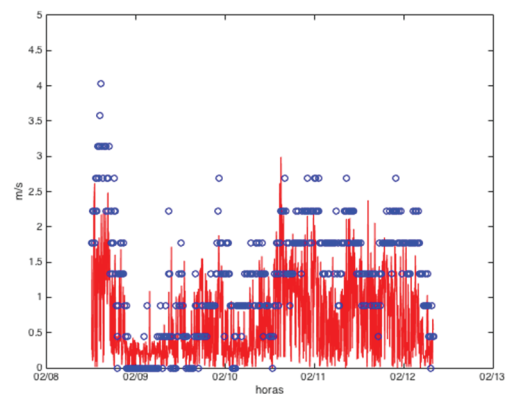


Figura 56 - Comparación de velocidad del viento entre estación meteorológica (azul) y boya (rojo).

4.7.2 Pruebas de validación del prototipo v2

Tras realizar las pruebas al prototipo v2 y definido su estado final, este se replicó para todos los nodos sensores y fue montado sobre la estructura de las boyas. Habiendo fijado esta estructura sobre la boya, se cambiaron los flotadores utilizados en las pruebas de campo anteriores por bolas de poliestireno de mayor diámetro, con lo cual se busca mejorar la flotabilidad y estabilidad de la boya ante el oleaje y otras perturbaciones marítimas (Figura 57).



Figura 57 – Segunda versión de prototipo del envase para el nodo sensor y su montaje sobre la boya.

Es importante notar que, con la nueva posición de la caja de la electrónica y el cambio de los flotadores, se espera que las antenas de comunicaciones estén siempre por encima del nivel del mar (en ausencia de fuerte oleaje). Este cambio debería de verse reflejado en una reducción de pérdida de datos del GPS y debería mejorar la estabilidad de las comunicaciones LoRa con el dron o con alguna posible estación en tierra. Para probar esta hipótesis, se realizó una prueba adicional en la playa de Pichilingue en La Paz (México) donde las boyas se configuraron a captar variables cada 5 minutos y se realizaron múltiples descargas de datos (Figura 58 y Figura 59).



Figura 58 – Prototipo v2 de las boyas en funcionamiento en la playa de Pichilingue (México).



Figura 59 – Ruta trazada por una boya en la playa de Pichilingue (México). El círculo representa el inicio y la estrella representa el fin.

Los resultados de estas últimas pruebas fueron bastante positivos, con una correcta adquisición de datos ambientales y posiciones GPS, además de que fue posible notar una mayor estabilidad en las comunicaciones LoRa. Con el prototipo v2 de la carcasa y el cambio de los flotadores de las boyas, se notó una mejoría en la resistencia al oleaje, siendo mucho

más estable y totalmente estanco. Estos resultados muestran que el sistema se encuentra validado a las expectativas del proyecto SIMMA en su totalidad y que se encuentra listo para su utilización en la monitorización del parque nacional "Cabo Pulmo" en México, la zona de interés principal del proyecto SIMMA y patrimonio natural de la humanidad.

4.8 Discusión

Las pruebas de campo realizadas en la playa de "El Tecolote", al igual que las pruebas de laboratorio previas, a manera general permitieron validar el funcionamiento del sistema SIMMA en su totalidad, desde la captura de datos hasta las comunicaciones inalámbricas LoRa. Como se mencionó en la descripción de la propuesta, dentro del funcionamiento del sistema se contempla un modo de captura de datos y otro de rescate; a pesar de que este último no fue validado en campo, solo en laboratorio, al ser una versión más simple de la descarga de datos, se sobre entiende que su funcionamiento es el correcto.

Si se comparan los resultados obtenidos en la playa de "El Tecolote" con las propuestas de sistemas híbridos de Zolich *et al.* (Zolich *et al.*, 2016) y Barbatei *et al.* (Barbatei, Skavhaug and Johansen, 2015), mencionados en la sección 4.2.4, se pueden notar diversas mejoras. Desde la perspectiva de transmisión inalámbrica de datos, se validó que el uso de las comunicaciones LoRa en el sistema SIMMA es capaz de transmitir a 4 km de distancia con una tasa de datos de 5.4 kbps, lo cual es 10 veces el rango obtenido por Zolich *et al.* y con una velocidad mayor de transferencia de datos. Adicionalmente en el trabajo de Zolich *et al.* se detectaron problemas de interferencia con un módulo de radio secundario utilizado en su cuadricóptero, a pesar de que estos utilizaban distintos protocolos de comunicación y frecuencia de operación (433 MHz y 868 MHz). En las pruebas de validación de la sección 4.3.4, así como el resto de pruebas de campo, no fue posible detectar problemas de interferencia entre las radiocomunicaciones del UAV y los módulos LoRa utilizados entre los distintos nodos del sistema. En términos de consumo de potencia, si se compara con la propuesta de Barbatei *et al.*, la cual tiene una huella energética menor a la de Zolich *et al.*, los *transceivers* LoRa consumen menos energía tanto en transmisión como recepción (LoRa: 86.4/42.6 mW, FSK: 92.4/69.3 mW). Los puntos antes mencionados implican que LoRa tiene un menor consumo de potencia por mensaje de datos transmitido, lo cual incrementa la vida útil de un nodo, con un rango de transmisión notablemente mayor.

A pesar de que la configuración probada en "El Tecolote" (SF7, BW125 y CR1) es considerada de las de menor alcance entre sus otras posibles configuraciones, con este rango de transmisión se supera la cobertura de la mayoría de las implementaciones marítimas, con excepción de las comunicaciones satelitales. En situaciones donde se busque

tener mayor rango, se podría utilizar los resultados de las pruebas de largo alcance realizadas en Cullera (Tabla 14) como base para estimar la altura a la que debería sobrevolar un UAV. Sin embargo, en situaciones de incremento de rango como el escenario donde se logaron casi 50 km en Cullera (Tabla 14), es importante tomar en cuenta varias consideraciones, como el tiempo de vuelo del dron, el *bitrate* de las transmisiones LoRa, la frecuencia de captura de datos y el modo de operación del dron. Al incrementar el *spreading factor* de un dispositivo LoRa es posible aumentar el rango de transmisión, pero se reduce el *bitrate* efectivo, con lo cual se incrementa el tiempo de descarga de datos de un nodo sensor. Por otro lado, un aumento en la frecuencia de captura de datos y periodos de funcionamiento extendidos produce grandes cantidades de datos. En cualquiera de estos escenarios es probable que sea necesario realizar múltiples vuelos debido a la longevidad de la batería del UAV, identificando primero la posición de las boyas para hacer una extracción de datos posterior. Otra alternativa sería extraer exclusivamente los datos GPS de las boyas para recolectar las boyas y después extraer los datos en laboratorio o utilizar una base en tierra en una posición elevada para reclutar las boyas y desde ahí realizar la descarga, aunque ambas soluciones subutilizan los dispositivos del sistema. Sin embargo, como se muestra en la Tabla 10, es posible utilizar otras configuraciones que incrementarían el rango de manera notable pero mantienen un *bitrate* que no requeriría modificaciones al patrón de vuelo de un UAV.

Debido a la construcción de las boyas Davis y su ligera estructura, existe un caso funcional alternativo en el que éstas también sean utilizadas como boyas estacionarias ancladas al fondo marino. En este escenario, la ubicación de los nodos sensores sería conocida, por lo que es posible realizar recolecciones de datos con el dron desde una ubicación remota o utilizar una estación base en tierra. En el primer caso se presenta la ventaja de que, al conocer la localización de los dispositivos, es posible crear una ruta de vuelo mucho más precisa para cada recolección de datos. En cambio, si se utilizase una base en tierra, la red podría estar configurada para rangos de transmisión largo y alta frecuencia de captura sin ningún problema, algo similar al funcionamiento de algunas implementaciones actuales. La ventaja que se presenta con la arquitectura del sistema SIMMA es que la infraestructura es muy reducida, siendo que solo se requeriría un ordenador portátil y tener un nodo maestro conectado a este.

Habiendo realizado las modificaciones a la carcasa que contenía la electrónica, el prototipo v2 fue capaz de resistir cualquier tipo de entrada de agua, aún con oleaje, conservó una temperatura ideal para el correcto funcionamiento de la electrónica y mantuvo una elevación apropiada para mejorar el enlace de comunicaciones GPS y LoRa. Además de esto, habiendo realizado la re-calibración de los sensores e integrando el EPS sobre la carcasa del sensor ambiental, los datos obtenidos alcanzaron el nivel de precisión requeridos para la monitorización de las variables, utilizando sensores más de bajo coste que alternativas comúnmente usadas en boyas marítimas. Este segundo prototipo, después

de haber sido validado en campo, avala la viabilidad del uso de sistemas de monitorización híbridos con UAVs y boyas utilizando comunicaciones LPWAN, como lo es la tecnología LoRa, en ambientes marítimos. A manera general, debido al rango de estas comunicaciones inalámbricas, sin lugar a duda presentan una alternativa que debería ser considerada para cualquier tipo de monitorización ambiental.

4.9 Conclusiones

En este capítulo se presentó el diseño y desarrollo de una arquitectura de una red de sensores inalámbricos no supervisados, asistida por UAV, para monitorización de variables ambientales en zonas costeras con el fin último de la preservación de dicho entorno. Esto se llevó a cabo utilizando la modulación LoRa, para la cual se desarrolló *hardware* y *firmware* para este específico propósito, además de un protocolo de red propietario (LoRaNET). Este sistema fue aplicado al proyecto SIMMA con el fin de proveer una alternativa de bajo consumo energético, bajos requerimientos de infraestructura y costo económico, comparado con implementaciones actuales en el campo.

La integración de dos tecnologías de largo alcance en un solo sistema, el UAV y LoRa, proporciona un método para el estudio de áreas de difícil acceso de manera remota, con un mínimo de interacción humana directa. A su vez, esto presenta una manera poco invasiva para la monitorización de las áreas protegidas y reservas naturales, un punto que resulta de gran valor en estos entornos.

Las comunicaciones LoRa en conjunto con la movilidad del UAV, permite cubrir grandes extensiones de superficie en un corto espacio de tiempo, lo cual resulta de gran utilidad para el seguimiento de nodos con trayectorias no supervisada. Este método permite la búsqueda de nodos con predicciones simples, ya que, en el caso de líneas costeras, solo es necesario conocer la dirección de las corrientes para iniciar la ruta del dron en ese sentido. Es posible mejorar este procedimiento agregando algoritmos de predicción embebidos en la tecnología, sin embargo, eso requiere una mayor potencia computacional y una mayor interacción entre la red y el dron del sistema.

A manera general, las tecnologías como LoRa presentan nuevas oportunidades para la monitorización ambiental en áreas de gran extensión, debido a su bajo consumo energético y rango extendido de comunicaciones. En conjunto con protocolos IP, como Ethernet o WiFi, además posibilitan su monitorización en tiempo real con un mínimo de infraestructura. Además, dadas las características de la modulación, también resulta viable su uso en entornos urbanos como edificios inteligentes o ambientes industriales, aunque este enfoque no fue abordado en este capítulo.

Capítulo 5: Métricas para el análisis, selección y diseño de una WSN

Con el aprendizaje obtenido en los proyectos realizados, se presenta una propuesta de metodología y métricas para el diseño, selección y desarrollo de una WSN en cualquier campo de aplicación. De manera inicial, se realiza una evaluación de los distintos estudios presentes en la literatura, la cual se emplea como base para la propuesta. De este análisis, se extraen métricas para su clasificación e integración dentro de la metodología desarrollada. Para la validación de esta misma, se realiza un estudio en un edificio con distintos protocolos y casos de aplicación, haciendo énfasis en la importancia del análisis de las métricas de hardware, red y aplicación. Por último, se presenta una discusión sobre la propuesta realizada y las conclusiones observadas.

5.1 Introducción

Hoy en día quizá una de las WSN más conocidas son los sistemas de redes IoT, ya que estas han logrado crear entornos en los que los objetos del mundo físico y los servicios de tecnologías de la información interactúan entre sí de manera intuitiva, proporcionando sistemas comprensivos, perceptivos e inteligentes para todo tipo de usuarios (Ma, 2011). La importancia y masificación de estos sistemas ha llegado a un punto en el que es posible encontrar desarrollos que simplifican los procesos de despliegue a usuarios no-técnicos, permitiendo así realizar implementaciones sencillas pero útiles para ciertas necesidades

(Azmi and Kamarudin, 2017; Harish Kumar, 2017). Sin embargo, como se mostró en los capítulos anteriores, el diseño y desarrollo de una WSN específica para una aplicación sigue siendo un proceso complejo, el cual requiere un nivel de experiencia y conocimiento técnico especializado para poder realizar una implementación óptima.

Las WSN en general presentan diversos retos de diseño, como el consumo energético de la red, la ubicación de los dispositivos, la correcta propagación de las señales, el mantenimiento de los dispositivos, entre otros. Además, la selección de un protocolo inalámbrico también se ha convertido en un reto, debido al crecimiento exponencial de estos en los últimos años. Tan solo en aplicaciones IoT existen una gran variedad de opciones, como ZigBee (Froiz-Míguez *et al.*, 2018), LoRaWAN (Rizzi *et al.*, 2017), SigFox (Janssen *et al.*, 2018), WiFi (Shi *et al.*, 2017), Bluetooth (Teran *et al.*, 2017), Z-Wave (Pavan, 2018), 6LowPAN (Arndt *et al.*, 2017), NFC (Kishore Kumar Reddy N. G. and Rajeshwari K., 2017), Enocean (Esmaili and Jamali, 2015), NarrowBand-IoT (Petrov *et al.*, 2018), así como múltiples protocolos propietarios. Esto significa que, para una aplicación en concreto, suelen existir múltiples protocolos posibles. Sin embargo, en situaciones donde se requiere seleccionar la opción más óptima, tener una variedad tan grande de alternativas resulta problemático, puesto que requiere realizar análisis a fondo de distintos factores para poder llegar a una conclusión.

En sí, el diseño de una WSN es un tema complejo que aborda múltiples tópicos de ingeniería, dificultando la implementación de estos sistemas. Existen algunos *softwares* de simulación de WSN (Levis *et al.*, 2003; Inzillo and De Rango, 2016; Bukhari, Siraj and Rehmani, 2018) que buscan modelar escenarios y protocolos para ayudar en la implementación de estos sistemas. Sin embargo, estos presentan ciertas limitantes (Chéour *et al.*, 2017) y mayoritariamente solo cubren aspectos relacionados a transmisión de mensajes, además de requerir un nivel de entendimiento técnico elevado. En la literatura es posible encontrar una pléthora de métricas de diseño de redes que pueden ser utilizadas para lograr este objetivo; no obstante, son pocos los estudios que cubren todos los aspectos relativos a la red de manera detallada y, en algunos casos, presentan un enfoque específico en un protocolo en concreto.

Para intentar superar este reto de diseño, en este capítulo se buscará presentar al lector una propuesta de metodología para el diseño de WSN general, utilizando como base aplicaciones IoT. El objetivo es proveer una herramienta que ayude a guiar a diseñadores potencialmente nuevos o experimentados en la implementación de una red de sensores, desde el proceso de identificación de los posibles protocolos de red hasta la selección de una tecnología y su optimización. Para lograr este objetivo, se realizará una compilación de las métricas, o parámetros, de WSN más relevantes en la literatura científica para su análisis y comparación; integrando éstas con la experiencia adquirida por el autor en el desarrollo de los sistemas mostrados en esta tesis. En base a las mismas, se propondrán una clasificación y una serie de directrices de diseño para su implementación. Aunado a esto,

se proporcionará una comparativa práctica desde la perspectiva de capa de red, utilizando múltiples protocolos de comunicación inalámbricos en distintos escenarios de aplicación.

5.2 Métricas en la literatura

Las WSN son una tecnología compleja que se encuentra en constante evolución y progreso, presentando innovaciones en sus distintos aspectos, ya sea en tema de sensores, protocolos de red, sistemas operativos específicos, componentes de arquitectura central, etc. No obstante, como tal, no existe un método estandarizado para el diseño, desarrollo o caracterización de estos sistemas. La implementación de estas WSN es un tópico que se aprende a partir de trabajos científicos realizados, notas de aplicación, sugerencias de fabricantes y el análisis de métricas; siendo estas últimas quizá, el método más estudiado y aceptado para el análisis de las redes de sensores.

Una métrica se puede definir como una medida para la evaluación cuantitativa o cualitativa de un proceso (Khan, Saad and Aalsalem, 2012), siendo aplicable a múltiples disciplinas. En tema de WSN, existe una vasta cantidad de métricas disponibles para su análisis, modelado, diseño y optimización. No obstante, dichos estudios tienden a abordar aspectos específicos de las redes, como el consumo energético y características físicas de los dispositivos. Esto se aprecia en los trabajos de Beutel (Beutel, 2006), que propone un análisis de métricas relevantes tanto de los dispositivos de percepción (nodo sensor) como en las propiedades físicas de los módulos de radio. En los dispositivos de percepción se enfoca principalmente en la capacidad computacional del nodo, tal como su arquitectura, frecuencia de reloj, memoria de programa, memoria de datos, capacidad de almacenamiento, periféricos y los sensores del nodo. Por otro lado, en los módulos de radio se mide su frecuencia de operación, velocidad de transmisión, potencia de transmisión/recepción, sensibilidad del receptor, tipo de modulación, tipo de antena, canales y rango de transmisión a línea de vista. Por otro lado, Asensio *et al.* (Asensio *et al.*, 2013) realizan una comparativa entre arquitecturas de nodos WSN, donde miden la corriente, tiempo y carga de los distintos modos de operación, actividades y estados transitorios de los nodos sensores; a fin de identificar el tipo de arquitectura más conveniente para las redes de sensores; y Martínez *et al.* (Martínez *et al.*, 2015) presentan una metodología para el modelado del consumo energético de dispositivos IoT, donde consideran las actividades de transmisión y las de procesamiento de datos.

En características de red, Khan *et al.* (Khan, Saad and Aalsalem, 2012) proponen una división dentro de las métricas de enrutamiento, donde se evalúan las métricas de desempeño de la red, calidad del servicio (QoS, *Quality of Service*), seguridad y calidad del enlace. Dentro de estas podemos encontrar métricas como: vida útil de la red, carga de enrutamiento, consumo energético, escalabilidad, *jitter*, eficiencia del ancho de banda,

resiliencia de la red, latencia, entre otros. Almamou *et al.* (Almamou *et al.*, 2009) abordan este tema a nivel de protocolos de enrutamiento, realizando una comparativa de métricas de proporción de paquetes enviados, la proporción de sobrecarga del tráfico de mensajes, la proporción de mensajes de control corruptos recibidos y la media del número de saltos de una transmisión de punta a punta.

Por otro lado, desde la perspectiva de calidad de señal, destacan trabajos como el de Bera *et al.* (Bera *et al.*, 2018) evalúan el desempeño de una plataforma IoT midiendo la proporción de paquetes entregados, dividiendo el total de paquetes transmitidos entre el total de los recibidos, el consumo energético de la red donde se incluye la energía de transmisión, recepción y en espera, y la sobrecarga de mensajes, que es la suma de los mensajes de control y datos transmitidos. Snigdh y Gupta (Snigdh and Gupta, 2016) realizan una recopilación de distintas métricas para medir la QoS en la cobertura de una transmisión, dentro de éstas se encuentran la confiabilidad, consumo energético, tolerancia a fallos y retardos en la señal. Jang y Healy (Jang and Healy, 2010) estudian distintos indicadores para medir la confiabilidad de redes en edificios; dentro de ellos se encuentra el RSSI, LQI (*Link Quality Indicator*), PDR (*Packet Delivery Rate*) y PER (*Packet Error Rate*). Éstos indicadores representan una estimación de la potencia promedio de una señal en el receptor, la pureza de la señal frente a distorsión, la cantidad de paquetes transmitidos y la proporción de paquetes no recibidos exitosamente, respectivamente. Barac *et al.* (Barac, Gidlund and Zhang, 2015) discuten el uso de las métricas de RSSI y LQI en entornos industriales para medir el nivel de interferencia de redes basadas en el estándar 802.11, sugiriendo que estos indicadores no son totalmente fiables. Por último, Kirubasri y Uma Maheswari (Kirubasri and Uma Maheswari, 2016) discuten la necesidad de estimadores de calidad de señal y como estas benefician a las WSN. En su artículo hablan sobre las dos grandes divisiones de estas métricas, las basadas en *hardware* y las de *software*. En la primera se encuentran el RSSI, LQI y SNR (*Signal-to-noise Ratio*), mientras que la segunda presenta subdivisiones basadas en el PRR (*Packet Reception Rate*), RNP (*Request Number of Packets*) y en calificaciones, donde sugiere una asignación de valor a la calidad de lo medido.

Como se puede apreciar, todos estos estudios abordan el uso de las métricas enfocándose en solo una o algunas características de las WSN; pocos realizan un análisis que abarque todos los aspectos que componen a estos sistemas. Uno de los más recientes, es el estudio realizado por Yuan *et al.* (Yuan, Kanhere and Hollick, 2017), donde hacen una recopilación extensa de métricas de WSN y las clasifican entorno a su enfoque principal: nodo, salto, punto-a-punto y de red. Además, estas las subdividen acorde a la capa del modelo OSI (Day and Zimmermann, 1983) donde intervienen. En este trabajo se detalla en gran medida cada una de las métricas que consideran relevantes y explican cómo se utilizan en un análisis de manera independiente. No obstante, a pesar de su gran aportación, este

estudio no propone una metodología para poder implementar directamente estas métricas en el diseño de WSN, por lo que resulta más útil como epítome de parámetros.

5.3 Clasificación de las métricas para el diseño de WSN

Como se muestra anteriormente, las métricas de diseño de redes han sido extensamente estudiadas en la literatura, ya sea en temas específicos o considerando todas los componentes de una red. Tan solo dentro de las redes IoT se encuentran una gran variedad de parámetros, siendo algunos exclusivos a estos y la gran mayoría genéricos para cualquier implementación de WSN. Además, para cada aspecto de la red existen métricas cuantitativas o cualitativas, de las cuales algunas son esenciales para el análisis de diseño y otros que sirven para afinar con gran precisión cada implementación.

Por estos motivos, para simplificar el análisis de estas métricas y brindar un claro entendimiento sobre ellas, se propone realizar una clasificación en tres grupos fundamentales de acuerdo al tipo de dispositivo que representan o su rubro: *hardware*, red y aplicación. En las siguientes sub-secciones se presenta esta categorización y una compilación de métricas recolectados de la literatura. Es importante aclarar que estas métricas solo toman en cuenta dispositivos *edge* e intermediarios, ya los dispositivos de la nube tienden a ser provistos y administrados por terceros y no por el diseñador.

5.3.1 Métricas de *hardware*

La clasificación de métricas de *hardware* considera todos los parámetros que se pueden analizar en físico o que son propiedades innatas de los circuitos integrados seleccionados, los cuales son aplicables a dispositivos como microcontroladores, sensores, memorias y *transceivers* de red. Dentro de estas métricas, como se mencionó previamente, existen algunos parámetros cualitativos que también requieren ser analizados, por lo que es importante distinguir entre estas y su contraparte. Debido a esto, en la siguiente tabla las métricas cuantitativas serán destacadas para realizar esta distinción (Tabla 16).

Tabla 16 – Métricas de *hardware* relevantes, donde el punto indica si es cuantitativa.

Parámetros	Cuantitativo	Definición	Referencia
Voltaje	●	Voltaje de operación del dispositivo (V)	(Shelke and Ingle, 2017)
Corriente pico	●	Máximo consumo de corriente en un instante dado (A)	(Botteron <i>et al.</i> , 2016; Chen <i>et al.</i> , 2016)
Fuente de alimentación		Fuente de potencia del dispositivo (baterías, energy harvester, enchufe de corriente, etc.)	(Akhtar and Rehmani, 2015; Shaikh and Zeadally, 2016b; Babayo, Anisi and Ali, 2017)

Modalidades de operación		Disponibilidad de modalidades de bajo consumo (<i>sleep</i> , <i>deep sleep</i> , <i>hibernar</i> , etc.)	(Baranov <i>et al.</i> , 2018; Mukherjee <i>et al.</i> , 2018)
Potencia de transmisión	●		
Potencia en <i>sleep</i>	●		(Asensio <i>et al.</i> , 2013; Yan, Sun and Qian, 2013; Folea and Mois, 2015; Kuo and Li, 2016; Lee, Blaauw and Sylvester, 2016; Solares <i>et al.</i> , 2016)
Potencia en idle	●	Potencia requerida en una actividad o fase de operación (W)	
Potencia de sensado	●		
Potencia de tareas adicionales	●		
Potencia en estados de transición	●	Potencia requerida en los eventos de conmutación entre modos de operación (W)	(Pughat and Sharma, 2015)
Capacidad de procesamiento		Potencia computacional para administrar las actividades a realizar	(Anadiotis, Morabito and Palazzo, 2016; International Electrotechnical Commission, 2016; Zhu <i>et al.</i> , 2016)
Desvío del reloj de sistema	●	Sesgo en frecuencia que crea variaciones en actividades con tiempos precisos (%)	(Wang, Zeng and Wang, 2015; Terraneo, Riccardi and Leva, 2018)

Como se muestra en la Tabla 16, esta clasificación presenta un fuerte enfoque en el consumo energético de la red, el cual es uno de los retos fundamentales de las WSN en general (Meshkova *et al.*, 2008). A pesar de que existe una clara distinción entre las métricas de *hardware* y red, usualmente es necesario extraer algunos de los parámetros de *hardware* en primera instancia, puesto que estos pueden ser requeridos para el cálculo de las métricas de red.

5.3.2 Métricas de red

Esta clasificación representa los parámetros directamente relacionados a los dispositivos de radiofrecuencia, tanto de la capa PHY como de la capa MAC, sin tomar en cuenta centros de datos o servidores de almacenamiento. A pesar de que estas métricas no tienen un enfoque tan fuerte en el consumo energético, como en el caso de los parámetros de *hardware*, algunas de éstas pueden tener fuertes repercusiones en la demanda general de la red (Tabla 17).

Tabla 17 – Métricas de red relevantes, donde el punto indica si es cuantitativa.

Parámetros	Cuantitativo	Definición	Referencia
Topología de red		Estructura virtual definida para una red (estrella, malla, árbol, etc.)	(Silicon Labs, 2013b; Bilbao, 2017; H. Wang <i>et al.</i> , 2018)
Sensibilidad del receptor	●	Nivel de señal mínimo teórico capaz de ser captado por el receptor (dBm)	(Raza, Kulkarni and Sooriyabandara, 2017a; Yuan, Kanhere and Hollick, 2017)
Potencia de salida	●	Potencia a la que se transmite una señal (dBm)	(Correia and Nogueira, 2008; Akbas <i>et al.</i> , 2016)

Frecuencia de operación	●	Frecuencia base a la que un dispositivo transmite información (Hz)	(Ghayvat <i>et al.</i> , 2015; Moravejosharieh and Lloret, 2016)
Tasa de transferencia de datos	●	Velocidad a la que se transmiten los datos (bps)	(Yuan, Kanhere and Hollick, 2017)
Tamaño del payload	●	Cantidad máxima de datos transmitidos en un solo paquete (Bytes)	(Gunduzalp, Yildirim and Tatar, 2015; Moravejosharieh and Lloret, 2016)
RSSI	●	Indicador de fuerza de la señal recibida en el receptor (<i>Receiver Signal Strength Indicator</i> , dBm)	(Nagaraju <i>et al.</i> , 2016; Amri <i>et al.</i> , 2017)
Encriptación de datos		Algoritmos de encriptación para datos en tránsito	(Bartoli <i>et al.</i> , 2011; Al-Kashoash and Kemp, 2016; Froiz-Míguez <i>et al.</i> , 2018)
Escalabilidad		Capacidad de crecimiento de un sistema en una situación dada.	(International Electrotechnical Commission, 2016; Sethi and Sarangi, 2017; Jindal, 2018)
Latencia	●	Retardo temporal entre la transmisión y recepción de datos (s)	(Khanafer, Al-Anbagi and Mouftah, 2017; Sethi and Sarangi, 2017; Yuan, Kanhere and Hollick, 2017)
Energía por mensaje	●	Energía consumida en la transmisión de datos, incluyendo mensajes de ACK y saltos entre nodos intermediarios	(Nadeem <i>et al.</i> , 2013; Singh and Verma, 2017)
Número de dispositivos	●	Número de nodos de una red en un contexto dado	(Kaur, Kaur and Singh, 2014)
LQI		Indicador de calidad del enlace de la señal recibida	(Panousopoulou, Azkune and Tsakalides, 2016; Septiana, Soesanti and Setiawan, 2016)
Seguridad		Metodologías para protección de datos en almacenaje o al transmitir	(International Electrotechnical Commission, 2016; Sethi and Sarangi, 2017)
Eficiencia energética en enrutamiento		Algoritmos de transmisión con capacidad de percatar la energía del sistema	(Zhong <i>et al.</i> , 2014; Septiana, Soesanti and Setiawan, 2016; Amri <i>et al.</i> , 2017; Singh and Verma, 2017)
SNR	●	Razón de señal a ruido (<i>Signal to noise ratio</i>)	(Shbat, Ordaz-Salazar and Gonzalez-Salas, 2018)
PRR	●	Razón de paquetes recibidos (<i>Packets Received Rate</i> , %)	(Sajjad, Bouk and Yousaf, 2015; Kulau <i>et al.</i> , 2016)
PER	●	Razón de paquetes con error (%)	(Blanckenstein <i>et al.</i> , 2015; Hung <i>et al.</i> , 2017)
PELR	●	Razón de paquetes perdidos por error (%)	(Yuan, Kanhere and Hollick, 2017), (Iacono <i>et al.</i> , 2017)

5.3.3 Métricas de aplicación

En las implementaciones en el mundo real, los requerimientos de las aplicaciones definen y restringen el diseño de una red IoT, dentro de escenarios y capacidades específicas. Al iniciar un proyecto, resulta vital tomar en cuenta las necesidades particulares

de cada despliegue requieren para la apropiada selección de un protocolo inalámbrico, tipo de sensores, dispositivos de uso final y de más elementos de una red (Tabla 18).

Tabla 18 – Métricas de aplicación relevantes, donde el punto indica si es cuantitativa.

Parámetros	Cuantitativo	Definición	Referencia
Tiempo de implementación	●	Tiempo requerido para el despliegue de un sistema (días, semanas, meses, años)	(Todoli Ferrandis, Santonja Climent and Sempere Payaá, 2012)
Restricciones energéticas		Limitación de un dispositivo o sistema para extraer energía de una fuente de alimentación	(Peng and Chen, 2015; Shaikh and Zeadally, 2016b; Sudharsana, 2017; Georgiou, Xavier-De-Souza and Eder, 2018)
Confidencialidad de datos		Restricción de visibilidad de datos para ciertos grupos de usuarios	(Farooq <i>et al.</i> , 2015; Bertino, 2016; International Electrotechnical Commission, 2016)
Disponibilidad de datos en tiempo real		Disposición de datos bajo demanda o en el momento de adquisición	(Yu, Weller and Grattan, 2015; Palaniswami, Rao and Bainbridge, 2017; Wu <i>et al.</i> , 2018)
Tasa de sensado y envío de datos	●	Define el periodo de obtención de datos y transmisión de los mismos. También conocido como ciclo de operación (s, min, hrs)	(Ali, Soe and Weller, 2015; Lukas, Tanumihardja and Gunawan, 2015; Iacono <i>et al.</i> , 2017; Raza, Kulkarni and Sooriyabandara, 2017a)
Ubicación de la red		Escenario en el que se desplegará (urbano, industrial, etc.)	(Aburukba <i>et al.</i> , 2016a; Edwards-Murphy <i>et al.</i> , 2016; Pavan, 2018)
Requerimientos de infraestructura		Necesidad de utilizar infraestructura de red adicional para su funcionamiento	(Rodríguez <i>et al.</i> , 2015; Katona <i>et al.</i> , 2016; Boubrima, Bechkit and Rivano, 2017)
Mantenimiento e instalación		Mide la facilidad de implementación y los recursos necesarios para su mantenimiento (baterías, actualizaciones, reparaciones, etc.)	(Minhas <i>et al.</i> , 2018; Morillo <i>et al.</i> , 2018a)
Escalabilidad		Necesidad de un sistema para expandirse o crecer bajo distintas situaciones.	(Alazzawi and Elkateeb, 2008; International Electrotechnical Commission, 2016; Sethi and Sarangi, 2017; Jindal, 2018)
Variables de monitorización		Define las variables que se buscan medir del entorno y que determinan los sensores a utilizar	(Ali, Soe and Weller, 2015; Botteron <i>et al.</i> , 2016; Orfei, Benedetta Mezzetti and Cottone, 2017; Palaniswami, Rao and Bainbridge, 2017)
Restricciones económicas	●	Recursos económicos disponibles para el despliegue, dispositivos, personal y mejoras (€)	(Anand <i>et al.</i> , 2015; Sanchis-Cano <i>et al.</i> , 2017)
Tolerancia a fallos		Tolerancia máxima de errores permitidos en un periodo de tiempo o cantidad de transacciones	(Chouikhi <i>et al.</i> , 2015; Munir, Antoon and Gordon-Ross, 2015; Salayma <i>et al.</i> , 2017)
Longevidad del sistema	●	Expectativa de vida el despliegue (semanas, meses, años)	(Jurenoks and Novickis, 2017; Morillo <i>et al.</i> , 2018b)

Estas métricas representan los requerimientos de proyecto y en su mayoría son parámetros incuantificables. A pesar de esto, cada uno de estos tiende a tener un alto

impacto en el diseño o selección de un tipo de red. Un ejemplo de ello podría ser la necesidad de confidencialidad de datos en un proyecto, al presentar una restricción de este tipo se limitan los protocolos a seleccionar, excluyendo quizá tecnologías con menores consumos energético o velocidades de transferencia mayores.

Todas las métricas de diseño son válidas y relevantes para cualquier implementación IoT, no obstante, las métricas de aplicación ayudan a definir la relevancia de los demás parámetros. Debido a esto, las métricas de diseño se pueden ejemplificar de manera similar a una pirámide de Maslow (Maslow, 1943), donde las necesidades personales se sustituyen por las métricas de aplicación que definen la relevancia de los parámetros de *hardware* y red (Figura 60). De igual manera, las métricas se clasifican en tres categorías de acuerdo a su nivel de relevancia: clave, alta y baja. En la pirámide los parámetros de mayor influencia se encuentran en la base y los de menor en la punta.

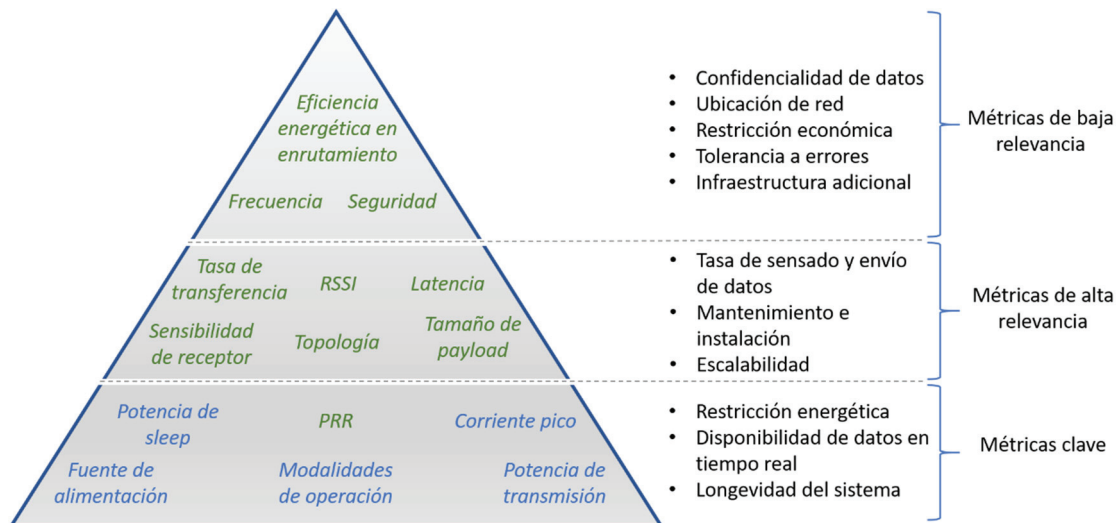


Figura 60 – Ejemplo de escenario donde se resalta la relevancia de distintas métricas aplicables. Los parámetros de hardware (azul) y de red (verde) se encuentran dentro de la pirámide, mientras que los parámetros de aplicación se encuentran fuera de la pirámide.

5.4 Metodología

Tras definir las diferentes categorías de métricas de diseño, es necesario determinar la estructura o metodología a seguir para el correcto uso de este conocimiento. En la Figura 61 se muestra la propuesta recomendada para llevar a cabo dicha implementación y, posteriormente, se detalla las distintas fases de la metodología.



Figura 61 – Pasos para la implementación de la metodología de métricas de diseño de redes.

5.4.1 Fase de diseño inicial

La fase inicial se caracteriza principalmente por la evaluación del escenario de aplicación, donde se definirán los requerimientos específicos al caso y el tipo de proyecto que se estudiará. Como primer paso es necesario definir el tipo de análisis que se busca realizar, ya sea para una nueva implementación o para la mejora de un sistema ya puesto en marcha, dado que esto delimitará las fases de diseño requeridas y, por ende, los parámetros necesarios. Posteriormente se debe asignar un nivel de relevancia (clave, alta y baja) a las distintas métricas de aplicación, basándose en las necesidades intrínsecas del sistema a analizar (Tabla 19). Esto es un punto clave puesto que, como se muestra en la Figura 60, estos requerimientos ayudarán al diseñador a identificar los factores más relevantes para el sistema y a asignar las debidas prioridades a las métricas de *hardware* y red.

Tabla 19 – Tabla de relevancia de la fase de diseño inicial. La columna "Nivel de relevancia" se deja vacía ya que se llena al momento de implementar la metodología.

Fase de diseño inicial		
Parámetros	Clasificación	Nivel de relevancia
Tiempo de implementación	Aplicación	

Restricciones energéticas	Aplicación
Confidencialidad de datos	Aplicación
Disponibilidad de datos en tiempo real	Aplicación
Tasa de sensado y envío de datos	Aplicación
Ubicación de la red	Aplicación
Requerimientos de infraestructura	Aplicación
Mantenimiento e instalación	Aplicación
Escalabilidad	Aplicación
Variables de monitorización	Aplicación
Restricciones económicas	Aplicación
Tolerancia a fallos	Aplicación
Longevidad del sistema	Aplicación

Una vez definidas la relevancia de las métricas, será necesario enfocarse en las fases consiguientes, según el tipo de análisis que se busca realizar. Suponiendo una nueva implementación, el estudio se iniciaría por la fase de diseño básica.

5.4.2 Fase de diseño básica

La fase básica representa la primera etapa de evaluación del sistema en sí, donde se muestran las capacidades de una o múltiples tecnologías desde un punto de vista general, apoyándose, en su mayor parte, en la información proporcionada por las hojas de especificaciones y documentos técnicos. En esta, se analizan principalmente los parámetros de *hardware* y red más elementales de cualquier proyecto.

Antes de iniciar algún tipo de evaluación en esta fase, es necesario definir una arquitectura central para los nodos que cumpla con las necesidades del proyecto; siendo esta misma la base para los análisis de los elementos de red. Para la arquitectura central se deberá realizar la selección de dispositivos como microcontroladores, sensores, memorias y otros periféricos. Este diseño de nodos puede ser una implementación personalizada o estar basada en una arquitectura comercial de tipo Arduino, Raspberry PI, BeagleBone Black, etc. Posteriormente, se realizará un estudio de las distintas opciones de protocolo de comunicaciones existentes que cuenten con las características deseadas, realizando una selección de estos y de sus correspondientes *transceivers*. Definida la arquitectura central y los módulos de RF, se realizará la asignación de prioridades a las métricas de esta fase de diseño y, consecutivamente, se extraerán los valores pertinentes a estas (Tabla 20).

Tabla 20 – Tabla de relevancia de la fase de diseño básica. Las columnas "Valor" y "Nivel de relevancia" se dejan vacías ya que se llenan al momento de implementar la metodología.

Fase de diseño básica			
Parámetros	Clasificación	Valor	Nivel de relevancia
Voltaje de operación (V)	Hardware		
Corriente pico (mA)	Hardware		
Fuente de alimentación	Hardware		
Modalidades de operación	Hardware		
Topología	Red		
Sensibilidad del receptor (dBm)	Red		
Potencia de salida (dBm)	Red		
Frecuencia de operación (MHz)	Red		
Tasa de transferencia de datos (kbps)	Red		
Tamaño de <i>payload</i>	Red		

Es posible que al finalizar esta etapa del análisis se pueda reducir la selección de protocolos de red a un grupo menor, ya que los parámetros extraídos pueden arrojar información útil que podría descartar algunas de las opciones contempladas. Incluso, es factible el poder inferir el protocolo de red más adecuado; sin embargo, se recomienda completar el análisis para poder llegar a una selección definitiva.

5.4.3 Fase de diseño avanzada

La fase avanzada ahonda más en el diseño, utilizando múltiples parámetros para comprender el alcance de las características de las tecnologías analizadas. En la mayoría de los escenarios, tanto la fase básica como la avanzada son requeridas para seleccionar el protocolo apropiado para la implementación; sin embargo, la fase avanzada es la que busca reducir las opciones a una única tecnología.

En esta fase se recomienda desarrollar un pequeño número de prototipos para los distintos nodos o utilizar *kits* de desarrollo. Estos prototipos permitirán realizar mediciones veraces de las distintas métricas prioritarias y, de esta manera, garantizar la correcta selección de la tecnología. Se podría argumentar que el desarrollo de nodos para diversas tecnologías agrega gastos adicionales a un proyecto, lo cual es cierto y en algunos escenarios podría no ser deseable. Sin embargo, se considera que la realización de mediciones *in situ* compensa este gasto inicial, puesto que permite identificar posibles variaciones en la extracción de métricas, ya sea por imperfecciones en la manufactura de

piezas, implementaciones de *firmwares* o mediciones en condiciones ideales. Ejemplos de ello son el RSSI, el cual oscila considerablemente dependiendo de las obstrucciones en la línea-de-vista de la transmisión, o la energía de los mensajes, que varía de acuerdo al número de reintentos que pueda realizar un nodo para hacer llegar los datos al receptor. Aun así, puede haber escenarios donde no sea posible realizar estos desarrollos, por lo que en dichos casos se recomienda continuar con un análisis teórico.

Posteriormente, al igual que en la fase básica, se deberá realizar la asignación de prioridades a las métricas de *hardware* y red relevantes y se medirán en los dispositivos correspondientes. En los casos donde no se implementen los prototipos, se recomienda extraer los parámetros de hojas de especificaciones, notas técnicas y literatura científica (Tabla 21).

Tabla 21 – Tabla de relevancia de la fase de diseño avanzada. Las columnas "Valor" y "Nivel de relevancia" se dejan vacías ya que se llenan al momento de implementar la metodología.

Fase de diseño avanzada			
Parámetros	Categoría	Valor	Nivel de relevancia
Potencia en transmisión (mW)	Hardware		
Potencia en recepción (mW)	Hardware		
Potencia en sleep (mW)	Hardware		
Potencia en idle (mW)	Hardware		
Potencia de poll (mW)	Hardware		
RSSI (dBm)	Red		
Encriptación de datos	Red		
Escalabilidad	Red		
Latencia del mensaje (s)	Red		
Latencia de poll (s)	Red		
Energía por mensaje (mJ)	Red		
Energía por mensaje de poll (mJ)	Red		
Número de dispositivos requeridos	Red		

A partir de los datos recabados en la Tabla 21, además de la tasa de sensado y envío estipulada en la fase de diseño inicial, se realizarán cálculos energéticos para cada escenario de operación y protocolo para su comparación.

En la comparación de los protocolos, es importante tomar en cuenta las prioridades asignadas a las diferentes métricas. Sin la asignación de estas "jerarquías", se tendría un

análisis de múltiples características válidas, pero difícilmente se podría discernir cuales son más relevantes en el proceso de selección tecnologías de red. Para finalizar, en base a los resultados obtenidos en las fases básica y avanzada, se seleccionará el protocolo de red que más se adecúe a las necesidades impuestas por los requerimientos de aplicación. En el caso de proyectos con limitantes de tiempo de implementación o que sean desplegados por periodos cortos de tiempo, es posible realizar la implementación de la WSN o red IoT con los datos obtenidos hasta esta fase de diseño. Sin embargo, para proyectos sin limitantes de tiempo o que busquen realizar mejoras a una implementación activa, se recomienda proceder a la fase de diseño detallada.

5.4.4 Fase de diseño detallada

La fase detallada reúne diversas métricas para afinar el diseño con el protocolo seleccionado, enfocándose en mejorar características como la calidad del enlace de transmisión o procesos de operación.

Esta fase se podría considerar opcional para muchos casos, no obstante, se sugiere completar todos los proyectos aplicando las métricas de las cuatro fases descritas. La relevancia de esta fase radica en que estos análisis permiten la optimización de aspectos claves del sistema, tales como los tiempos de transmisión, consumo energético de los nodos o la integridad de las transmisiones. Aunque el impacto de las métricas de esta etapa puede no ser tan notorio como las de fases anteriores, en muchos casos estas ayudan a afinar problemas que resultan de la implementación de la red y que difícilmente pueden ser identificados en las fases anteriores. Cabe resaltar que, para poder aplicar las métricas de esta fase, se requiere tener un sistema funcional en el sitio de interés, ya que el análisis es práctico en su totalidad. Teniendo la red de sensores activa, el diseñador procederá a la asignación de prioridades y medición de las últimas métricas para identificar los nichos de posibles mejoras y, posteriormente, hacer los ajustes necesarios (Tabla 22).

Tabla 22 - Tabla de relevancia de la fase de diseño avanzada. Las columnas "Valor" y "Nivel de relevancia" se dejan vacías ya que se llenan al momento de implementar la metodología.

Fase de diseño detallada			
Parámetros	Categoría	Valor	Nivel de relevancia
Potencia en estados de transición	Hardware		
Capacidad de procesamiento	Hardware		
Desvío del reloj de sistema	Hardware		
LQI	Red		
Seguridad	Red		
Eficiencia energética en enrutamiento	Red		

SNR	Red
PRR	Red
PER	Red
PELR	Red

Finalmente, se recomienda realizar una última extracción de las métricas de *hardware* y red más relevantes del proyecto para comparar con los resultados iniciales, pudiendo así cuantificar las mejoras logradas.

5.5 Implementación de la metodología

5.5.1 Entorno y escenarios de pruebas

Para ejemplificar el uso de las métricas de diseño, en esta sección se realizará una comparativa entre tres tecnologías inalámbricas IoT: WiFi (802.11b), LoRaNET y ZigBee. Estos protocolos fueron seleccionados debido a sus notables diferencias entre sí; por un lado WiFi representan a las arquitecturas de red tipo *edge-to-cloud*, mientras que ZigBee y LoRaNET son del tipo *gateway-mediated edge*. Además, cada una de estas tecnologías presenta una cobertura de red física muy distinta a la otra, teniendo así protocolos que representan las PAN, MAN y WAN.

Estos tres protocolos de IoT serán puestos a pruebas y analizados bajo varios casos de aplicación, propuestos a modo de ejemplo, que simularán situaciones reales con la finalidad de encontrar las ventajas y desventajas que presenta cada uno. Para esto se proponen tres escenarios con distintos requerimientos, aplicados todos ellos al Edificio de I+D+i del Campus Rio Ebro de la Universidad de Zaragoza (España). El edificio tiene un área de aproximadamente 7.200 m², cuenta con tres plantas en total, cada una con seis alas individuales divididas por paredes de hormigón que delimitan las distintas oficinas, y un patio central como se muestra en la Figura 62.



Figura 62 – Edificio del I3A en Zaragoza, España (imagen extraída de Google Maps).

Este edificio cuenta con una infraestructura WiFi previamente establecida, como es el caso de muchos sitios públicos, lo cual fungirá como enlace directo a la nube y punto de conexión para todos los nodos WiFi. Para los ensayos a realizar, se realizará una monitorización de los puntos más distantes en cada ala, puesto que estos representan el mayor reto para cualquier despliegue. El objetivo de esta comparación no es el de encontrar el mejor protocolo para cada escenario, si no evaluar las tecnologías bajo distintos requerimientos de aplicación y demostrar la relevancia de las métricas de diseño, así como el impacto que tiene un apropiado análisis de diseño de red. A continuación, se presenta el detalle de cada escenario.

Escenario A

En el edificio hay diversos laboratorios químicos donde se comenzará a realizar pruebas de sustancias las cuales son sensibles a cambios de temperatura y humedad. Existe un cierto umbral permisible en los cambios de estas variables; sin embargo es muy reducido y una exposición prolongada a niveles inadecuados exigiría tener que reiniciar los experimentos. Por ello es necesario tener una monitorización constante y en tiempo real de cada laboratorio para así poder realizar ajustes a los sistemas de calefacción y humidificadores de cada sitio. Los experimentos durarán un par de meses; aunque, debido a que la mayor parte del dinero se utilizó en la realización de los experimentos, el presupuesto para la monitorización es bastante reducido. Esto implica que el sistema necesita poco mantenimiento y gastos de instalación, por lo que una propuesta de bajo consumo energético es deseada.

Escenario B

En el edificio se busca tener un mayor control sobre el sistema de aire acondicionado, para evitar el uso inadecuado del recurso y reducir la huella energética del edificio. Previamente se realizó un estudio del uso de aire acondicionado en el edificio y se concluyó que donde existía un mayor uso de este sistema era en las oficinas, ubicadas en los extremos de cada ala. Debido a que estas representan un porcentaje considerable del uso del sistema, en dichas oficinas se desea monitorizar la temperatura para poder realizar ajustes de acuerdo al régimen de confort establecido. Puesto que son espacios de buen tamaño, la variación en temperatura es lenta y solo se requiere un reporte cada 10 minutos, aunque el sensado se solicita cada minuto. Si el experimento tiene éxito, el mismo sistema se implementará en el resto de edificios y estará en operación de manera continua.

Escenario C

Recientemente se realizó un estudio de productividad laboral en el edificio y se constató una disminución de la misma en comparación con años anteriores. Con el afán de incrementar la productividad en el edificio, se decidió realizar una monitorización de la

entrada y salida de cada empleado por medio de tarjetas NFC y cerradura electrónicos. La información de cada cerrojo electrónico desea ser recopilada de manera diaria y enviada a una base de datos en la nube, donde se podrá hacer un análisis de los datos y verificar el correcto cumplimiento de los horarios laborales. Se estiman que deberían haber alrededor de 1400 – 1500 lecturas por día y, debido a que se trata de información confidencial para la empresa, los datos no son de acceso público.

En los tres escenarios, como es habitual, se requiere que la instalación esté disponible tan pronto como sea posible.

5.5.2 Aplicación de las métricas a los escenarios

Habiendo definido la ubicación de los ensayos, los escenarios de aplicación y el *hardware* a utilizar en estos análisis, en las siguientes sub-secciones se procederá a emplear las métricas de diseño, siguiendo la metodología de trabajo propuesta, para estudiar los protocolos seleccionados.

Fase de diseño inicial

Basándose en las descripciones de los escenarios de monitorización que se buscan implementar en el edificio, en esta sección se presentan los requerimientos de aplicación para cada caso, organizados en tres categorías de relevancia: clave, alta prioridad y baja prioridad (Figura 63). Como se mencionó anteriormente, estos parámetros influyen directamente en la relevancia de las métricas de *hardware* y red de cada proyecto.

Escenario A		Escenario B		Escenario C	
Requerimientos clave	Implementación pronta	Requerimientos clave	Implementación pronta	Requerimientos clave	Implementación pronta
	Alta restricción energética		Alta restricción energética		Confidencialidad de datos
	VARIABLES DE MONITORIZACIÓN		VARIABLES DE MONITORIZACIÓN		VARIABLES DE MONITORIZACIÓN
	Datos en tiempo real		Poca infraestructura adicional		Escalabilidad
	Baja tolerancia a fallos		Longevidad (años)		Longevidad (años)
	Alta restricción económica		Escalabilidad		Infraestructura adicional mínima
Alta relevancia	Tasa de sensado y envío de datos (1 min c/u)	Alta relevancia	Tasa de sensado y envío de datos (1min/10 min)	Alta relevancia	Tasa de sensado y envío de datos (por activación/24 horas)
	Poca instalación y mantenimiento		Poca instalación y mantenimiento		Tolerancia moderada a fallos
	Longevidad (meses)		Tolerancia moderada a fallos		Instalación y mantenimiento
Baja Relevancia	Confidencialidad de datos	Baja Relevancia	Confidencialidad de datos	Baja Relevancia	Restricción energética moderada
	Ubicación de la red		Ubicación de la red		Ubicación de la red
	Escalabilidad		Sin restricción económica		Datos en tiempo real no requeridos
	Infraestructura adicional		Datos en tiempo real		Sin restricción económica

Figura 63 – Escenarios de implementación a analizar y asignación de prioridades de las métricas de aplicación.

Estando asignadas las prioridades de las métricas de aplicación, es posible identificar los parámetros *hardware* y red de mayor peso para cada escenario, tal y como se muestra en la siguiente figura (Figura 64).

Escenario A		Escenario B		Escenario C	
Requerimientos clave	Voltaje de operación	Requerimientos clave	Voltaje de operación	Requerimientos clave	Encriptación de datos
	Corriente pico		Corriente pico		Escalabilidad
	Potencia de transmisión		Potencia de transmisión		Topología
	Potencia de recepción		Potencia de recepción		Fuente de alimentación
	Modalidades de operación		Modalidades de operación		Modalidades de operación
	Potencia en <i>sleep</i>		Potencia en <i>sleep</i>		Potencia en <i>sleep</i>
	Potencia en <i>idle</i>		Potencia en <i>idle</i>		Potencia en <i>idle</i>
	Energía por mensaje		Energía por mensaje		Voltaje de operación
	Eficiencia energética en enrutamiento		Eficiencia energética en enrutamiento		Potencia de transmisión
	Latencia del mensaje		Fuente de alimentación		Potencia de recepción
	Latencia de <i>poll</i>		Sensibilidad del receptor		Potencia de salida
	Fuente de alimentación		RSSI		Tamaño de payload
	RSSI		Frecuencia de operación		Corriente pico
Alta relevancia	Sensibilidad del receptor	Alta relevancia	Potencia de salida	Alta relevancia	Energía por mensaje
	Frecuencia de operación		Tasa de transferencia de datos		Eficiencia energética en enrutamiento
	Potencia de salida		Topología		Sensibilidad del receptor
	Tasa de transferencia de datos		Escalabilidad		RSSI
Baja Relevancia	Topología	Baja Relevancia	Tamaño de payload	Baja Relevancia	Tasa de transferencia de datos
	Escalabilidad		Latencia del mensaje		Latencia del mensaje
	Tamaño de <i>payload</i>		Latencia de <i>poll</i>		Latencia de <i>poll</i>
	Encriptación de datos		Encriptación de datos		Frecuencia de operación

Figura 64 – Asignación de prioridades a las métricas de hardware y red para cada escenario.

Fase de diseño básica

Teniendo identificadas las métricas de mayor interés, en esta fase es necesario hacer un análisis de protocolos de comunicaciones para obtener una selección de tecnologías viables al escenario de aplicación. Sin embargo, para esta comparación en particular, dado que previamente se han seleccionados tres protocolos que se desean comparar, no es necesario realizar esta actividad. Es importante notar que este no es el procedimiento habitual y que solo se procedió de esta manera para fines de validación de las métricas y metodología.

Posteriormente es necesario definir el *hardware* de arquitectura central y *transceivers* a utilizar, para lo cual existe una gran variedad de posibilidades entre unidades de procesamiento central, periféricos, fuentes de alimentación, etc. Los dispositivos de la arquitectura central son variables que deben de tomarse en cuenta para los cálculos de las métricas de *hardware* y deben ser analizados en su totalidad. Sin embargo, debido a que

este estudio tiene un enfoque principal en tecnologías de red, se definirá una misma arquitectura de *hardware* central para ser empleada con los tres distintos protocolos. Con esto se simplifican los ensayos de manera significativa, puesto que la energía consumida por estos dispositivos será la misma para los tres casos y, por ende, puede ser considerado como una constante fija en los cálculos, dejando así solo las variables correspondientes a los dispositivos de red.

La arquitectura central propuesta de los nodos sensores (Figura 65) y los dispositivos de puerta de enlace (Figura 66), se puede observar representada en las siguientes figuras.

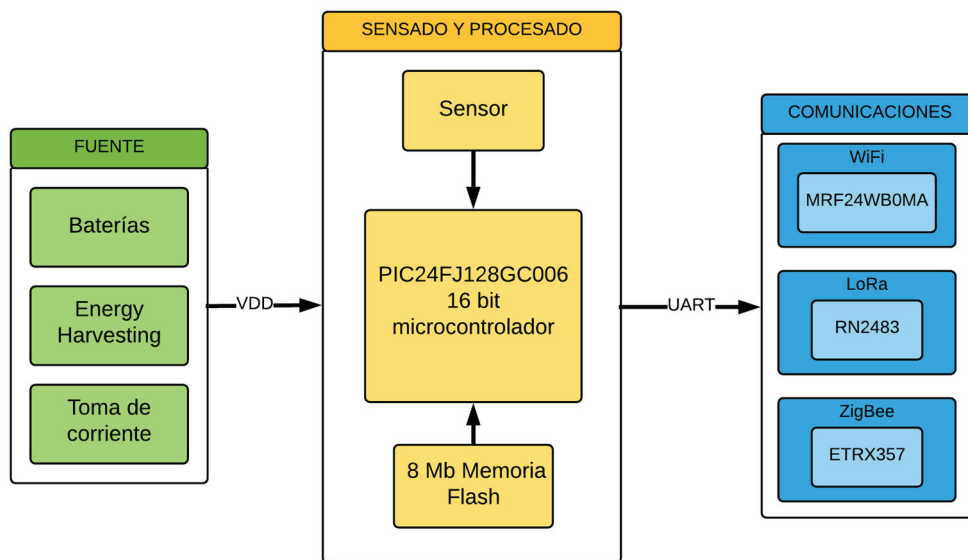


Figura 65 – Arquitectura central de los nodos sensores, donde se muestran algunas de las posibles tecnologías de fuente de alimentación y comunicaciones inalámbricas.

Como se puede notar en las figuras de arquitectura, para WiFi y LoRa se utilizan los mismos *transceivers* utilizados en capítulos anteriores, es decir el MRF24WB0MA y el RN2483, puesto que se dispone de un análisis a fondo de los mismos, tanto teórico como práctico. Por el contrario, dado que ZigBee es un protocolo que solo ha sido mencionado en capítulos anteriores, es necesario hacer una breve descripción del *transceiver* a utilizar. El módulo en cuestión es el EM357 de Silicon Labs, que tiene una frecuencia de operación de 2.4 GHz, es capaz de operar a voltajes de 2.1 V a 3.6 V y presenta un filtro de canales integrado para poder coexistir con otros estándares que utilizan la banda de 2.4 GHz como es el caso de WiFi (Silicon Labs, 2013a).

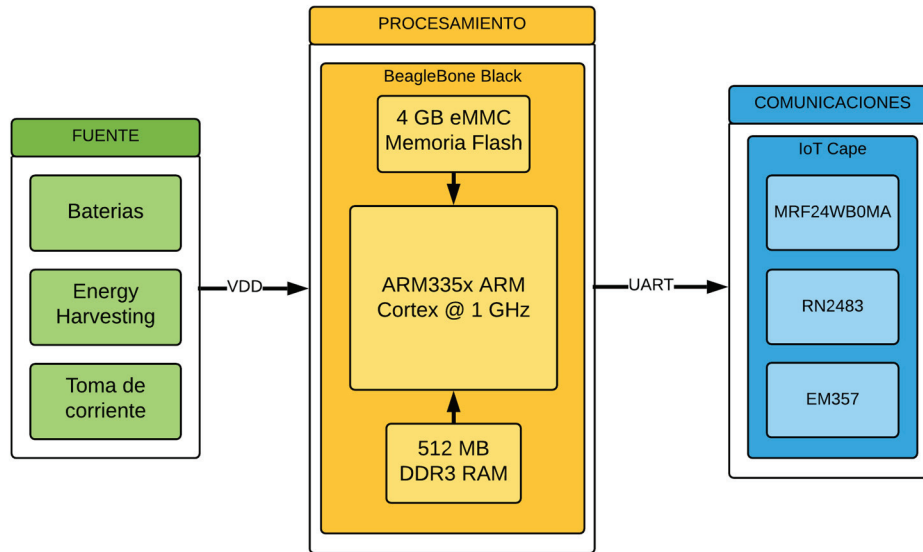


Figura 66 – Arquitectura central de la puerta de enlace basada en el mini PC BeagleBone Black. La capa IoT es un prototipo realizado por el grupo HOWLab que utiliza los transceivers de los tres protocolos.

La diferencia principal entre estas dos arquitecturas, reside en la complejidad de la puerta de enlace y su ausencia de dispositivos sensores. Esta se basó en el mini PC embebido BeagleBone Black y cuenta con una extensión, llamada capa IoT, que proporciona la conectividad con los tres protocolos a utilizar. Cabe destacar que, esta puerta de enlace utiliza el mismo *hardware* que se empleó en el capítulo 4 como nodo maestro para dron del sistema SIMMA (Figura 36). Por otro lado, el nodo sensor tiene una arquitectura de procesamiento mucho más simple, menor capacidad de almacenamiento y solo un *transceiver* por dispositivo.

Descritas las implementaciones electrónicas a utilizar en los nodos sensores y puerta de enlace, es posible proceder a la extracción de los parámetros de *hardware* y red de esta fase (Tabla 23)

Tabla 23 – Análisis de métricas de la fase de diseño básica. *PE significa puerta de enlace

Parámetros	Clasificación	Dispositivos		
		Silicon Labs EM357	Microchip MRF24WB0MA	Microchip RN2483
Voltaje de operación (V)	Hardware	3	3.3	3
Corriente pico (mA)	Hardware	31	260	37.2
Fuente de alimentación	Hardware	Baterías de nodos Enchufe de PE*	Baterías de nodos	Baterías de nodos Enchufe de PE*
Modalidades de operación	Hardware	Sleep e idle	Sleep	Sleep e idle
Topología	Red	Malla	Estrella	Estrella
Sensibilidad del receptor (dBm)	Red	-90	-91	-124
Potencia de salida (dBm)	Red	3	10	13

Frecuencia de operación (MHz)	Red	2400	2400	434
Tasa de transferencia de datos (kbps)	Red	250	1000	5.4
Tamaño de <i>payload</i>	Red	60	1000	120

Es importante aclarar que, de manera normal, en la tabla anterior también estaría la columna de nivel de requerimiento, sin embargo, al realizar un análisis de múltiples escenarios esto no es posible. Aunado a esto, algunas métricas cuentan con un rango de operación dentro de los dispositivos seleccionados; un ejemplo de ello es el voltaje de operación, el cual puede funcionar de 2.1-3.6 V para el EM357 y RN2483, mientras que el MRF24WB0MA solo de 2.7-3.6 V. En estos casos, se seleccionaron los valores de acuerdo a recomendaciones por los fabricantes o los resultados de los estudios previos, ya que solo se busca ejemplificar el uso de la metodología propuesta.

Como se muestra en la Tabla 23, existe una notable diferencia entre los tres *transceivers* en prácticamente todos los parámetros. Desde la perspectiva de *hardware* se puede apreciar una significativa diferencia en el consumo de corriente, un factor determinante en muchas aplicaciones IoT puesto que se tiende a seleccionar la tecnología de menor demanda debido al uso de fuentes de alimentación finitas o por los tiempos de operación extendidos que se buscan. En las métricas de red se puede resaltar las distintas topologías que se manejan, frecuencias de operación y tasa de transferencia de datos, los cuales pueden ser factores determinantes en escenarios como los aquí sugeridos.

Fase de diseño avanzada

Con el fin de poder medir los valores necesarios de cada *transceiver*, se realizaron pruebas de laboratorio y de campo para así poder obtener los parámetros faltantes. Para la extracción de algunos parámetros de red se colocaron dispositivos de cada tecnología en diversos puntos de interés del edificio para así poder simular cada escenario. Dado que cada tecnología presenta su topología de red propia, el despliegue de los distintos nodos varía entre ellos, por lo que fue necesario analizar este comportamiento. Para el caso de LoRa y WiFi, ambos utilizan una topología de estrella; sin embargo, el primero de estos es un sistema *gateway-mediated* y el otro es *edge-to-cloud*, por lo que cada uno tendrá una distribución propia (Figura 67).

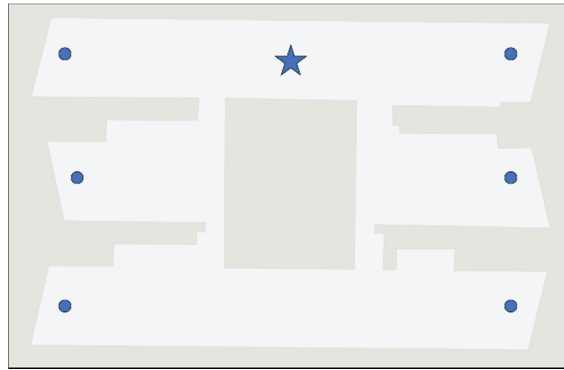


Figura 67 – Plano en 2D del edificio con la distribución de los nodos (círculos) y la puerta de enlace (estrella) para el protocolo LoRa.

En la Figura 67 se puede observar la planta superior del edificio con la distribución de nodos sugerida, sin embargo debido a que el edificio tiene tres plantas, solo la planta superior cuenta con una puerta de enlace; las otras plantas presentan la misma ubicación de los nodos sensores. La distribución de WiFi resulta muy similar a la del protocolo LoRa, con la diferencia de que esta no requiere una puerta de enlace a la nube, puesto que el edificio ya cuenta con una infraestructura de enrutadores para el acceso a Internet en las tres plantas (Figura 68).



Figura 68 - Plano en 2D del edificio con la distribución de los nodos (círculos azules) y los enrutadores de la infraestructura pre-establecida (estrellas anaranjadas) para el protocolo WiFi.

Por último, ZigBee presenta una topología de red tipo malla y, debido al diseño del protocolo, requiere dispositivos enrutadores ZigBee específicos para poder administrar el tráfico de red, lo cual incrementa de manera considerable el número de nodos del sistema. El despliegue de este sistema se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 69).

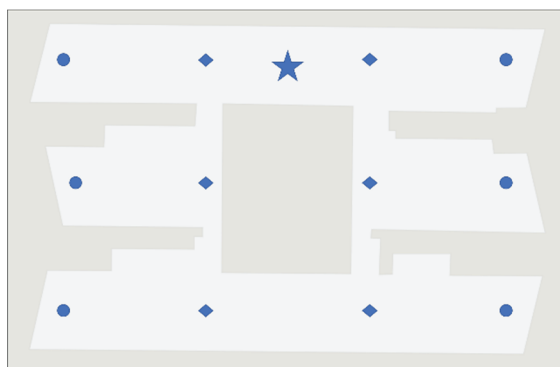


Figura 69 - Plano en 2D del edificio con la distribución de los nodos (círculos), enrutadores (rombos) y la puerta de enlace (estrella) para el protocolo ZigBee.

La ubicación de todos los dispositivos de cada protocolo se simuló asegurando que existiese una calidad de señal buena y estable, midiendo el RSSI promedio de cada dispositivo con su correspondiente puerta de enlace o dispositivo vecino y comparando estos valores con su sensibilidad de receptor. Los resultados de estos ensayos se muestran en la siguiente tabla (Tabla 24)

Tabla 24 - Análisis de métricas de la fase de diseño avanzada.

Parámetros	Clasificación	Dispositivos			
		Silicon Labs EM357		Microchip MRF24WB0MA	Microchip RN2483
Potencia en transmisión (mW)	Hardware	93		508.2	110.1
Potencia en recepción (mW)	Hardware	78		280.5	45.81
Potencia en sleep (mW)	Hardware	0.003		0.825	0.126
Potencia en idle (mW)	Hardware	18		N/A	16.2
Potencia de poll (mW)	Hardware	93		N/A	N/A
RSSI (dBm)	Red	-80		-75	-110
Encriptación de datos	Red	AES 128		1000	120
Escalabilidad	Red	Alta		Alta	Moderada
Latencia del mensaje (s)	Red	Min .032	Max .144	1.37	.345
Latencia de poll (s)	Red	Min .024	Max .108	N/A	N/A
Energía por mensaje (mJ)	Red	Min 2.97	Max 13.39	364.42	37.95
Energía por mensaje de poll (mJ)	Red	Min 2.23	Max 10.04	N/A	N/A
Número de nodos requeridos	Red	18 nodos sensores, 18 enrutadores y 1 puerta de enlace		18 nodos sensores y 1 puerta de enlace	18 nodos sensores

Al igual que en la fase básica, cabe aclarar que, de manera normal, en la tabla anterior no se representa la columna de nivel de requerimiento al estar realizando una evaluación de múltiples protocolos.

De los tres protocolos analizados es importante recordar que LoRaNET es el único que presenta diversas configuraciones de RF que pueden modificar directamente las transmisiones. En la banda de 433 MHz la sensibilidad máxima de receptor posible es de -150 dBm, es decir una configuración de SF12 y BW 125 kHz, lo cual provee un rango de transmisión muy elevado a costo de una latencia y baja tasa de transferencia. Por este motivo, para estos ensayos se utilizó la configuración de SF7, BW 125 kHz. Otro aspecto que es importante mencionar es que cada captura de datos por parte de los sensores, equivale a 10 bytes de información que después deberá ser transmitida a la puerta de enlace, lo cual influye en la cantidad de información que se puede enviar en un paquete debido al *payload* máximo de cada tecnología.

5.5.3 Proceso de selección y resultados

Siguiendo el proceso expuesto en la metodología, con la información obtenida en las fases de diseño, es posible iniciar el proceso de selección de protocolo para cada escenario. De manera estricta, este paso es parte de la fase de diseño avanzada, no obstante se decidió separar de esta sección para poder hacer énfasis en cada uno de los escenarios.

Escenario A

En el caso de monitorización de laboratorios (Figura 63), de la descripción se pueden extraer algunos de los requerimientos clave y de alta prioridad, como una alta restricción energética, baja tolerancia a errores, una alta restricción económica, disponibilidad de datos en tiempo real, una tasa de sensado y envío de 1 minuto c/u y un bajo nivel de mantenimiento e instalación. Dado que el consumo energético es una parte importante del proyecto, se realizó una extrapolación de los datos de la Tabla 23 y Tabla 24 para extraer el consumo total del sistema en un periodo de 24 horas para este escenario en específico (Figura 70).

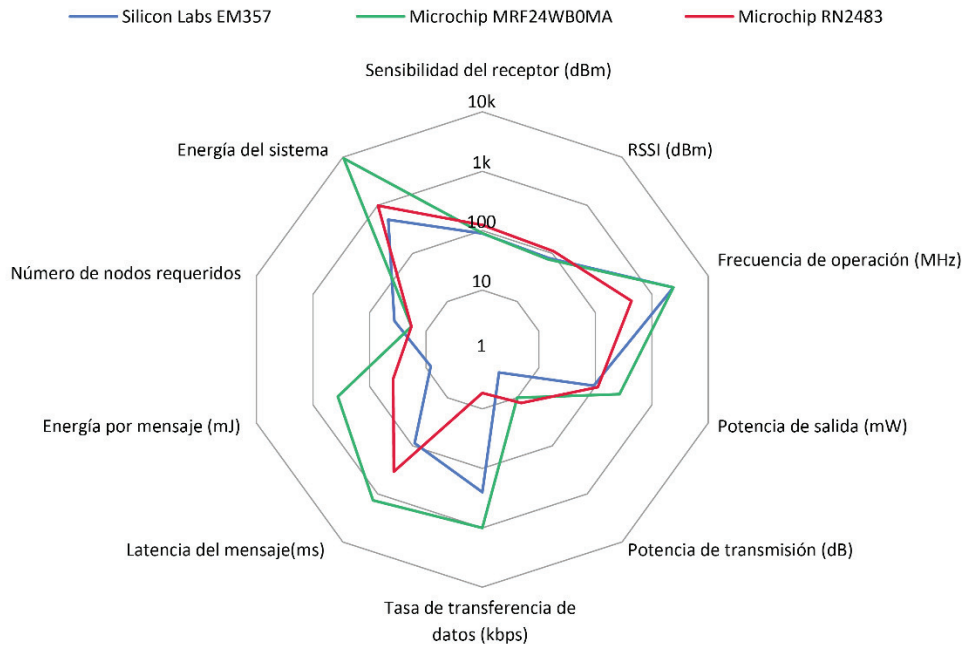


Figura 70 – Energía total del sistema calculada para un periodo de 24 horas con un tiempo de reporte de 1 minuto.

Para este escenario, debido a la alta frecuencia de reporte que se necesitaba, se consideró que ZigBee enviaba un mensaje de *poll* para mantener cada nodo constantemente conectado a la red creada. Debido a esto, en los cálculos de energía del sistema también se tomó en cuenta la demanda que estos mensajes generaban en el periodo de pruebas. Aun así, en la figura previa (Figura 70) se puede notar que ZigBee presenta una huella energética considerablemente menor que las otras tecnologías, consumiendo un total de 499 J, mientras que LoRaNET alcanza los 983 J y WiFi 9445 J. Teniendo un tiempo de reporte tan elevado, WiFi queda prácticamente descartado por la cantidad de energía que requiere, teniendo quizá como único punto a favor la sencillez de implementación. Una de las ventajas que presenta ZigBee es su baja latencia, lo que permite una transmisión rápida de la información y poder cumplir la necesidad de datos en tiempo-real. El mayor problema que presenta ZigBee para este escenario, es la cantidad de nodos que se requiere adquirir e instalar para poder tener un sistema funcional, ya que el presupuesto es bajo. LoRaNET podría ser una alternativa, puesto que tiene una latencia relativamente baja y un número reducido de dispositivos, sin embargo su consumo energético es prácticamente el doble que ZigBee. Esto significa que se quizá se tendría que requerir baterías de mayor capacidad para los nodos, implementar un sistema híbrido de baterías y *energy harvesting* para poder compensar el consumo o hacer cambios de baterías cada determinado tiempo. Debido a estos motivos, se cree que la mejor opción para este caso en particular es implementar una red ZigBee, a pesar del elevado número de nodos.

Escenario B

Para la aplicación donde se busca gestionar el sistema de aire acondicionado (Figura 63), se presenta una alta restricción energética, un tiempo de sensado y envío de 1min/10 minutos, una longevidad de sistema de múltiples años como requerimientos de mayor relevancia y un mínimo de infraestructura adicional. Además de esto, existe una necesidad de escalabilidad del sistema para futuras expansiones de aplicación. Dadas las restricciones energéticas presentadas, también se realizó un análisis energético del sistema para los tres protocolos por el mismo periodo de tiempo, pero modificando el tiempo de reporte al requerido (Figura 71).

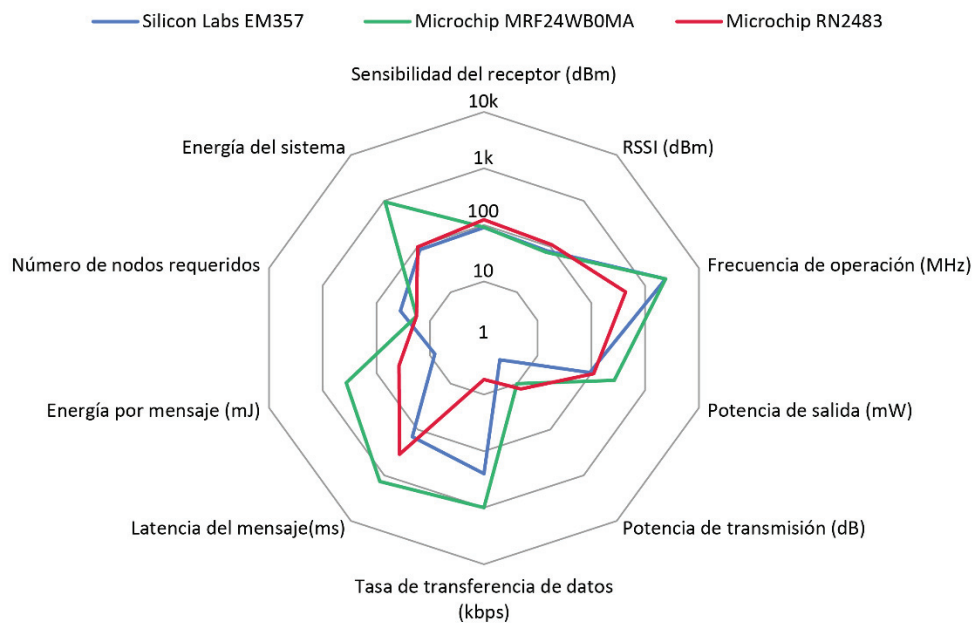


Figura 71 - Energía total del sistema calculada para un periodo de 24 horas con un tiempo de reporte de 10 minutos.

Reduciéndose el tiempo de reporte de 1 a 10 minutos, la cantidad de energía utilizada por cada protocolo se reduce de manera considerable (Figura 71). Desde esta perspectiva, ZigBee una vez más presenta el consumo más bajo con 84 J, aunque en este caso no varía tanto de LoRaNET el cual muestra 98 J de demanda y, por último, WiFi con 944 J. Para este escenario, los mensajes de *poll* de ZigBee no fueron utilizados debido a que era preferible pasar el dispositivo a modo de bajo consumo mientras no era requerido. No obstante, debido a que tiene un *payload* máximo de 60 bytes y cada paquete de datos sensados equivalen a 10 bytes, fue necesario enviar dos mensajes cada vez que se reportaban datos ya que en total se enviaban 100 bytes de información. Desde una perspectiva ideal, no debería de haber problemas de transmisión para ZigBee; sin embargo, en la presencia de redes WiFi se ha comprobado que las redes ZigBee tienden a presentar problemas de coexistencia (Froiz-Míguez *et al.*, 2018). Estos problemas de interferencia están relacionados principalmente con protocolos WiFi b/g/n, la cantidad de tráfico al

momento de transmisión y la distancia entre los *transceivers* de ambas tecnologías. Es difícil cuantificar exactamente la cantidad de interferencia que se puede esperar en un escenario dado, puesto que depende de diversos factores en el diseño; no obstante, de acuerdo a la literatura se puede esperar un PER de 15-20%, ya sea por fallo al acceder al canal (*Access Channel Failure*, ACF) o corrupción de datos (Mao, Zhao and Jia, 2011; Zhao *et al.*, 2014). Considerando esta información y la cantidad de re-transmisiones que se pudieran requerir, la energía total de ZigBee ronda los 100 J, un resultado ligeramente por encima de LoRaNET (Figura 70). Es posible disminuir estos niveles de interferencia para reducir el consumo, pero esto requiere análisis que son relevantes a la fase de diseño detallada. Por otro lado LoRaNET no presenta problemas de coexistencia con redes WiFi en general, principalmente debido a su modulación y distinto rango de frecuencia de operación, asegurando así un enlace de datos más estable con un bajo PER y PELR. Además de esto requiere la mitad de nodos que ZigBee para poder operar en la aplicación sugerida, lo cual se traduce a una instalación mucho más sencilla y menos mantenimiento, parámetros importantes a considerar. Tomando en cuenta lo analizado, la alta restricción económica, que no se requiere encriptación de datos y que existen posibilidades de crecer el sistema a futuro (escalabilidad), LoRaNET parece adecuarse mejor a las necesidades de este escenario de entre los tres protocolos.

Escenario C

En este último escenario, una empresa desea monitorizar las entradas y salidas del edificio, presenta una necesidad de confidencialidad de datos, escalabilidad y una vida de proyecto de varios años como requerimientos clave (Figura 63). La disponibilidad de datos en tiempo real no es requerida, puesto que solo se requieren reportes de datos cada 24 horas para análisis *a posteriori*, y se desea agregar el mínimo posible de infraestructura adicional. Desde la perspectiva de confidencialidad de datos, WiFi y ZigBee presentan encriptación de datos nativos en sus protocolos, lo cual los perfila como potenciales candidatos, mientras que para poder recibir un mensaje de LoRaNET solo se requiere tener la misma configuración de parámetros RF. Además de esto, WiFi y ZigBee tienen una capacidad de crecimiento de red elevada (escalabilidad), pudiendo tener más de 100 dispositivos por enrutador. En esta etapa del análisis, LoRa se encuentra prácticamente descartado y las otras dos tecnologías presentan características muy similares, que además se ajustan a las necesidades de este escenario. El otro requerimiento importante es una longevidad de varios años y existe una restricción energética moderada, por lo que se extrajo la energía total del sistema para las tres tecnologías (Figura 72).

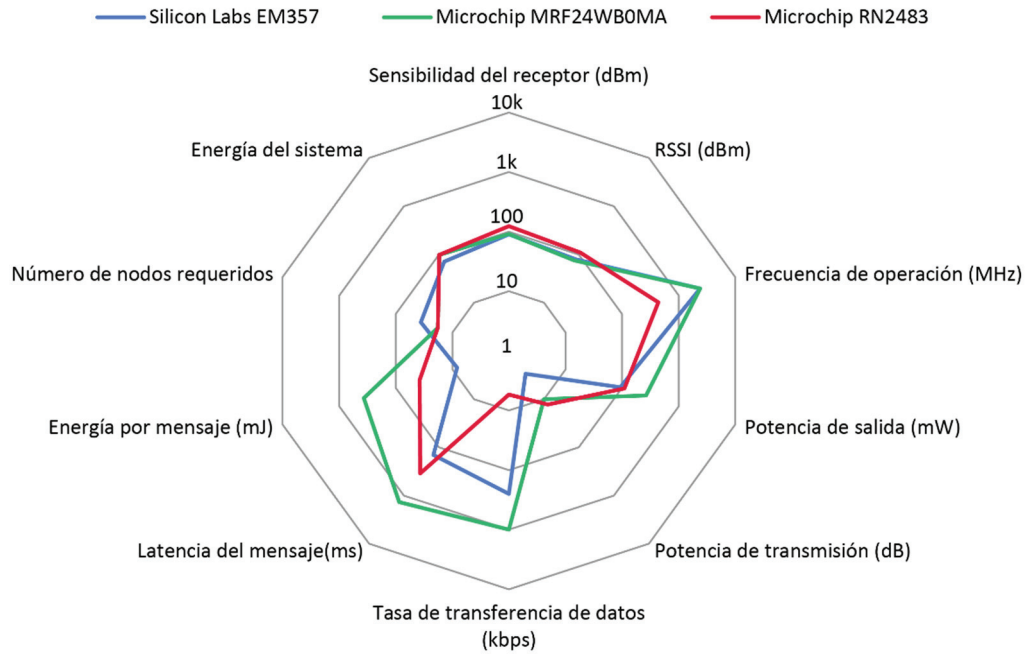


Figura 72 - Energía total del sistema calculada para un periodo de 24 horas realizando un reporte de datos diario.

Al reducir la frecuencia del reporte de datos se puede notar que la energía utilizada por una red WiFi se ve considerablemente reducida (98 J) al compararse con los resultados de los otros escenarios (Figura 70 y Figura 71). Por otro lado, LoRaNET no se ve modificado en absoluto con respecto al escenario B (98 J); y ZigBee, sin los mensajes de *poll*, sigue siendo el de menor demanda (70 J). Este comportamiento se debe al tamaño máximo de *payload* de las tecnologías, donde LoRaNET tiene un tamaño máximo de 100 bytes, ZigBee solo 60 bytes y WiFi hasta 1000 bytes, por lo que existe un número mínimo de mensajes que se requieren enviar para poder enviar la carga completa de datos que es del orden de las decenas de kB. Como se mencionó anteriormente, la alta demanda energética de WiFi es uno de los motivos por los que se tiende a descartar de diversas implementaciones IoT o WSN, sin embargo, teniendo una frecuencia de reporte de datos tan baja en este escenario, la mayor parte de la energía del nodo se ve consumida por el microcontrolador y sensor al adquirir datos ambientales. A pesar de que no existe una restricción energética, es importante notar que ZigBee sigue presentando la demanda más reducida de las tres redes, lo cual podría permitir un despliegue por múltiples años. Otros aspectos importantes a considerar es que se busca minimizar la infraestructura a desplegar y se tiene una baja tolerancia a errores, de los cuales el primero se cumple fácilmente debido a la ya existente red WiFi del edificio y la segunda depende de la cantidad de tráfico de red al momento de las transmisiones. No obstante, debido a su velocidad de transmisión y que no requiere puertas de enlace intermediarias, los datos pueden ser retransmitidos de manera rápida y eficaz. Por otro lado, ZigBee requiere prácticamente el doble de dispositivos para poder implementar la red, lo cual se traduce a un incremento en mantenimiento e instalación, los

cuales son requerimientos relevantes del escenario C. Habiendo establecido lo anterior, a pesar de la diferencia en demanda energética entre ZigBee y WiFi (Figura 72), el protocolo 802.11b resulta más adecuado para este escenario debido a que cumple con un mayor número de requerimientos, aunque ZigBee también pudiera ser una solución viable.

5.6 Discusión

Las métricas de diseño son una parte fundamental de cualquier implementación de WSN en general y es un tema que ha sido estudiado a fondo en la literatura. Sin embargo, existe una falta de directrices que indiquen como se deben utilizar en conjunto, dificultando su uso.

En la propuesta realizada en este capítulo, se realizó una clasificación de las métricas de la literatura, dentro de la cual se abordó una categoría que es difícil encontrar como tal en la literatura, es decir, las métricas de aplicación. Estas juegan un rol clave en la priorización del análisis de los parámetros en cada etapa de diseño, proveyendo una manera de discernir el peso que tendrán las métricas que se presentaron en la evaluación de la tecnología y/o protocolos a seleccionar. Por si solos, los valores medidos de los distintos parámetros pueden servir para comparar dos sistemas, sin embargo, si una métrica no es crítica para la implementación, la mejora cuantitativa de una tecnología resulta irrelevante. Un ejemplo de ello es el escenario C donde, si suponemos un análisis sin las métricas de aplicación, es probable que la selección del protocolo hubiera favorecido a ZigBee, contrario a la implementación de una red WiFi. Al no contar con una medida de relevancia, los factores como consumo energético del sistema y latencia de mensaje quizá hubieran sido un factor decisivo, dando un resultado no óptimo.

Posteriormente, se presentó una metodología con distintas fases de diseño, en donde se ofrecen directrices para la implementación de las métricas. Esta división dentro de la metodología ofrece una modularidad y flexibilidad necesaria para las distintos tipos de implementaciones existentes dentro de las WSN en general; ya sean sistemas a desarrollar o mejoras a diseños existentes. En este último caso resulta más notable la importancia de las fases de diseño, puesto que sin ellas solo se tendría un listado vasto de parámetros, los cuales se tendrían que analizar conceptualmente de manera individual para diferenciar los que podrían resultar útiles. Además, aportan una estructura necesaria a las métricas con una serie de pasos y recomendaciones a seguir, permitiendo la aplicación de la metodología a manera de manual de uso.

En el supuesto de la evaluación de los escenarios propuestos tan solo desde la perspectiva de *hardware* y red sin el seguimiento de las fases de diseño, probablemente el resultado de la comparativa tecnológica hubiera sido muy distinto.

Si se evalúan tan solo las métricas de *hardware* con las configuraciones de potencia sugeridas, los datos mostrados en la sección de resultados muestran a ZigBee como la tecnología de menor demanda energética de las tres por un margen notable, lo cual es, por lo general, ideal para una WSN. Por otro lado, WiFi sería la tecnología menos recomendable en este contexto, debido a sus altos niveles de consumo, aun cuando es el protocolo más ampliamente utilizado en dispositivos de todo tipo y que brinda un enlace directo a la nube.

Por otro lado, analizando las tres tecnologías solo con las métricas de red, es probable que se hubiera descartado LoRa desde un principio, dado que por el rango de transmisión del que es capaz, parece ser más adecuado para escenarios de ciudades inteligentes o monitorización en exteriores pero no tanto para edificios inteligentes. Para implementaciones IoT, WiFi podría considerarse la mejor opción debido a la ya existente infraestructura 802.11 en el edificio y la conectividad directa a la nube por parte de los nodos sensores. ZigBee también podría resultar viable debido a su bajo consumo energético y topología de malla, lo que permite gestionar inteligentemente la energía total del sistema.

La comparativa de diferentes protocolos en una misma ubicación permite resaltar la importancia de realizar un análisis a fondo y la implementación de la metodología propuesta, además de la alta relevancia de las métricas de aplicación. Si se hubiera realizado la evaluación de los escenarios propuestos tan solo desde la perspectiva de *hardware* y red sin el seguimiento de directrices, probablemente el resultado de la comparativa tecnológica hubiera sido muy distinto.

5.7 Conclusiones

En este capítulo se compilaron y analizar algunas de las métricas de diseño más relevantes para implementaciones IoT y de WSN, proveyendo al lector con un entendimiento de los distintos aspectos que requieren ser estudiados para poder realizar un proyecto de este tipo. Además, se proporcionó una metodología a seguir con distintas fases de diseño de redes para la implementación de estas métricas, la cual permite el uso de este estudio para el desarrollo de WSN en general. Dado que las redes IoT son sistemas multidimensionales, las métricas de diseño se clasificaron en tres categorías para simplificar su uso: *hardware*, red y aplicación. Cada una de estas juega un rol importante en el apropiado diseño de una red y deberían siempre ser utilizadas en conjunto al realizar un análisis de este tipo.

Las distintas categorías de métricas y las fases de diseño de la metodología, proveen al lector con un claro procedimiento en el análisis de una implementación de WSN. Por un lado, la clasificación de los parámetros ofrece una división con sentido para una búsqueda literaria, y por otro, las fases de diseño ofrecen puntos clave para la apropiada selección de la tecnología a utilizar, tanto para nuevas implementaciones como para mejoras a sistemas

Además, se realizó una comparativa de tres protocolos inalámbricos distintos, tanto de redes tipo *edge-to-cloud* como de *gateway-mediated*, para su uso en edificios inteligentes. Cada uno de estos protocolos se analizó desde la perspectiva de los distintos tipos de métricas bajo tres escenarios de aplicación. El resultado de estos análisis demuestra la relevancia de realizar un estudio completo de diseño de redes inalámbricas, puesto que muestra como protocolos distintos pueden resultar mucho más adecuados que tecnologías diseñadas y dedicadas para escenarios específicos. Por último, se demostró la relevancia de las métricas de aplicación y como estas afectan las prioridades de los distintos parámetros *hardware* y de red, desde la perspectiva de diseño.

Capítulo 6:

Conclusiones y líneas de trabajo futuro

Este último capítulo muestra las conclusiones globales obtenidas en el desarrollo de esta tesis, haciendo énfasis en las contribuciones más relevantes de la misma. Adicionalmente, se presentan las posibles líneas futuras de desarrollo e investigación observables en estos campos.

6.1 Conclusiones

Las WSN son sistemas que han tenido un gran impacto en la sociedad, tanto en la mejora de calidad de vida como en el entendimiento de los entornos. Estas redes permiten realizar análisis detallados de variables físicas de manera eficiente y acceder a información que anteriormente era de difícil acceso. En la presente tesis, se puso a prueba esta hipótesis de manera analítica y práctica en casos de aplicación con necesidades reales, basados en proyectos de investigación científica.

Específicamente, se mostraron dos casos de monitorización con necesidades específicas y ambientes totalmente distintos: el primero un entorno de vivienda, donde se requería auditar el comportamiento de sistemas de calefacción y, el segundo, una zona ecológica marítima protegida en la que se requieren monitorizar variables físicas. Cada escenario de aplicación presenta retos particulares para su implementación, teniendo como único común denominador la necesidad de implementación de metodologías de electrónica de bajo consumo.

Durante el proceso de diseño y desarrollo de ambos casos de aplicación fue posible identificar una gran variedad de métricas requeridas para llevar a cabo estas implementaciones. Sin embargo, el proceso para el uso de estas métricas no resultaba claro. Se encontraron metodologías que abordaban partes del diseño de una WSN, pero no existía un camino claro a seguir o maneras de identificar que los parámetros de mayor peso. Con esto en mente, se desarrolló una metodología para intentar cubrir ese aspecto faltante en la literatura y, para validar el proceso, se evaluaron tres casos de aplicación distintos.

Para finalizar este documento, se presentan las aportaciones de cada capítulo de manera individual, relacionando las mismas con las distintas publicaciones realizadas (Anexo III), y las líneas futuras de investigación derivadas del presente trabajo.

6.2 Aportaciones a las WSN autónomas con conectividad IP

En el capítulo 3, se presentó el diseño y desarrollo de un sistema energéticamente autónomo para la monitorización de sistemas de calefacción centralizada en la vivienda. En esta parte del trabajo se priorizó el uso de un protocolo con conectividad IP directa para los nodos sensores, simplificando su implementación en redes WiFi domésticas, ya que minimiza la necesidad de infraestructura de red adicional y reduce los costes de mantenimiento.

Las principales aportaciones de este capítulo son: **la implementación de nodos sensores de bajo consumo energético con comunicaciones WiFi y el uso de *energy harvesting* térmico**. Estas se ven reflejadas en una publicación de una contribución a congreso y un artículo en revista de impacto:

La contribución al congreso *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14)*, titulada "*WiFi Sensor Networks: A study of energy consumption*" (Trasvina-Moreno et al., 2014), se enfoca principalmente en la caracterización energética de un nodo sensor WiFi. En este estudio se planteó un análisis teórico inicial de un nodo WiFi, donde se definieron sus distintos estados de operación (inicialización, sensar datos, unirse a la red, reportar datos y *sleep*) y las actividades realizadas en cada uno. Para estas tareas, se estipularon fórmulas para el cálculo de la carga consumida. Este análisis se utilizó como marco de referencia para una evaluación práctica del nodo WiFi, donde se midió la carga de cada una de las actividades para el cálculo total de los estados de operación. A partir de esto, se realizó una comparativa de los protocolos TCP y UDP, bajo distintos escenarios de sensado y reporte de datos, en los que se evaluó la carga consumida por cada uno.

Este estudio se utilizó como base para fundamentar la hipótesis del uso de protocolos WiFi para WSN del capítulo 3. Por un lado, se identificaron las magnitudes de consumo de las distintas etapas del nodo, las cuales son necesarias para la implementación de metodologías de bajo consumo energético. Estas últimas resultan críticas en aplicaciones WiFi, puesto que es necesario equilibrar el consumo de los integrados fundamentales del nodo, es decir, el microcontrolador, el *transceiver* y el sensor. Por otro lado, se establecieron los escenarios de sensado y reporte más adecuado para este tipo de tecnologías, ya que es necesario identificar el tipo aplicaciones a las que se pueden orientar. Debido a su relativo alto consumo energético, el tiempo de reporte de datos juega un rol clave en cualquier implementación de este tipo. Por este motivo, las aplicaciones que no requieren datos en tiempo real o realizan minado de datos *a posteriori*, se consideran factibles para el uso de protocolos WiFi de manera exclusiva.

El artículo titulado "*Autonomous WiFi Sensor for Heating Systems in the Internet of Things*", publicado en la revista *Journal of Sensors* (C. A. Trasviña-Moreno *et al.*, 2016) (IF 1.704), realiza la propuesta de dispositivos WiFi energéticamente autónomos para la monitorización de sistemas de calefacción centralizada. En este trabajo se describe la arquitectura del nodo sensor WiFi, donde se implementaron metodologías de bajo consumo energético, tanto en *hardware* como en *firmware*, para su diseño. Dicho nodo fue evaluado de manera práctica, donde se midió el consumo energético del microcontrolador y *transceiver* en sus tres estados principales: sensado, transmisión e inactividad. Con esto se caracterizó la energía requerida por cada integrado en distintos ciclos de operación de sensado y transmisión. Posteriormente, se describió el sistema de *energy harvesting* el cual se utilizaría como fuente de alimentación para el nodo. Por este motivo, se caracterizó el comportamiento de la celda Peltier (transductor) y la etapa de acondicionamiento del *harvester* con respecto a las emisiones térmicas de un radiador. Finalmente, se evaluaron de manera práctica el nodo sensor junto con la etapa de *energy harvesting* en un entorno de vivienda, y se definió una ventana de operación para el nodo con la potencia de generación media.

El trabajo realizado en este artículo permitió validar la propuesta del nodo WiFi auto-sostenible como dispositivo auditor de sistemas de calefacción, proveyendo la arquitectura del nodo de bajo consumo y la fuente de potencia termoeléctrica. Se demostró que el uso de protocolos WiFi considerados obsoletos, como es el 802.11 b, y las nuevas generaciones de *transceivers* de bajo consumo, abren la puerta a la posibilidad de uso de estas tecnologías como bloque de comunicaciones inalámbricas exclusivo en WSN. Aunado a esto, se validó la hipótesis del uso de *energy harvesting* térmico como fuente de alimentación para un nodo de (relativo) elevado consumo energético en las viviendas. Al momento del estudio, gran parte de los sistemas similares al propuesto utilizaban baterías primarias o secundarias, y/o fuentes de *harvesting* para la recarga de estas.

6.3 Aportaciones a las WSN para preservación ambiental

En el capítulo 4 se presenta una propuesta de sistema de monitorización ambiental autónomo para entornos marinos. Este busca aportar, desde la perspectiva electrónica, una alternativa a las actuales implementaciones en estos ambientes, utilizando una arquitectura de sistema basada boyas sensorizadas y un dron como dispositivo recolector de datos *in situ*. Las aportaciones más notables al estado del arte son: **el desarrollo del propio sistema de monitorización basado en una red no supervisada de sensores asistida por dron para la monitorización marina de una zona ecológica protegida**. Estas se pueden apreciar en la publicación de una contribución a congreso y dos artículos científicos, siendo uno de ellos en revista de factor de impacto:

La contribución al congreso "*10th International Conference on Ubiquitous Computing & Ambient Intelligence*", titulada "*A Network Performance Analysis of LoRa Modulation for LPWAN Sensor Devices*" (Carlos A. Trasviña-Moreno et al., 2016), realiza un primer acercamiento a la modulación Lora, evaluando su comportamiento en distintas frecuencias de operación. En este estudio se propuso el análisis práctico de un módulo de LoRa en las bandas de 868 MHz y 433 MHz, sin la implementación de un protocolo de red. A su vez, se compararon distintas configuraciones de parámetro RF LoRa, con los cuales se ajusta el rango de transmisión. Estas evaluaciones se realizaron en un área con línea de vista, donde se midieron el RSSI, PRR, PER y PELR para cada configuración de parámetros LoRa en las bandas de frecuencia de interés.

El artículo "*Evaluation of the LoRa Modulation in the 433 mhz Frequency Band for Outdoor Monitoring*", publicado en la revista *DYNA New Technologies* (Trasviña Moreno et al., 2019), evalúa la modulación LoRa desde la perspectiva de consumo energético y capacidad de transmisión, utilizando la frecuencia base de 433 Mhz. El estudio realiza un análisis empírico y teórico de los parámetros de RF LoRa (*spreading factor, bandwidth, coding rate y payload*), basándose en el comportamiento de un nodo LoRa. En este se evaluó el impacto que tiene cada parámetro en tema de consumo energético en transmisión y tasa de transferencia de datos. De los parámetros RF LoRa, se seleccionó una configuración para realizar ensayos en un entorno urbano y en campo abierto. El primero evaluaba el comportamiento de la modulación en un ambiente densamente poblado con múltiples amortiguadores de señal, mientras el segundo buscaba definir la capacidad de propagación de las transmisiones.

Estos artículos permitieron, por un lado, cuantificar los beneficios de la reducción de frecuencia de transmisión, y por otro, identificar las configuraciones de parámetros RF LoRa más adecuados para el escenario de aplicación. Para la selección de estas últimas, se

buscó un balance entre consumo energético, rango de transmisión, tasa de transferencia e inmunidad al ruido del entorno.

En la literatura, la gran mayoría de las aplicaciones LoRa utilizan una frecuencia de operación de 868 – 902 MHz. Las mejoras en RSSI encontradas en la comparación de frecuencias, permitieron la validación de banda de 433 MHz para el entorno de aplicación, donde la potencia de penetración de la señal es un punto crítico. Desde la perspectiva de los parámetros LoRa RF, se comprobó que el *spreading factor* y *bandwidth* tiene el mayor impacto en consumo energético, mientras que el *coding rate* afecta en mayor grado a la tasa de transferencia de datos. De estas configuraciones de LoRa, se identificaron tres que serían utilizadas para la propuesta de sistema: SF12/BW 125 kHz para largo alcance, SF10/BW 125 kHz para alcance medio, y SF7/BW 125 kHz para corto alcance; todas con un CR4. En las pruebas de campo abierto, se observó el impacto que tiene la altura de los puntos de transmisión/recepción sobre la propagación de la señal de radio. Finalmente, se demostró la capacidad de la modulación de transmitir datos a una distancia de casi 50 km.

El artículo "*Unmanned Aerial Vehicle Based Wireless Sensor Network for Marine-Coastal Environment Monitoring*", publicado en la revista *Sensors* (Trasviña-Moreno *et al.*, 2017) (IF 2.475), propone la arquitectura de WSN LoRa asistida por dron para la monitorización de ambientes marinos. La función principal del dron es la de recolectar los datos de boyas sensorizadas sobre una línea costera en una zona ecológica protegida. Desde la perspectiva de red, el sistema está compuesto por nodos sensores y un nodo maestro, utilizando una topología de estrella en la que todos los elementos son móviles. Para la implementación de las comunicaciones LoRa, se diseñó y describió un protocolo de red, conocido como LoRaNET, para cubrir las necesidades específicas de la aplicación. En este artículo, se detalló el diseño de la arquitectura, modos de operación y actividades de los distintos nodos desarrollados para el sistema. Además, se describió el tipo de boya, la envolvente de los nodos sensores, el dron que se utilizó para las pruebas de campo y la interfaz gráfica utilizada para la configuración de todos los dispositivos.

El diseño y desarrollo de los nodos sensores, se llevó a cabo siguiendo metodologías de electrónica de bajo consumo energético, tanto en *hardware* como *firmware*. La aplicación de estas metodologías resulta crítico a la implementación debido a los periféricos de elevada demanda energética en el nodo (sensores, memoria externa, GPS y módulo LoRa) y las actividades que se requieren gestionar en sus distintos modos de operación. Los nodos sensores operaban de manera autónoma una vez iniciado su ciclo de trabajo, identificando los periodos de tiempo de actividad RF, la frecuencia de sensado, las condiciones para modificar su comportamiento energético y las situaciones de emergencia donde debe emitir mensajes de localización.

Finalmente, el sistema fue evaluado en distintas etapas: 1) se realizaron pruebas de estabilidad del *hardware* y *firmware* de los dispositivos, 2) se analizó el impacto de las

comunicaciones LoRa con los sistemas de RF del dron, y 3) se realizaron ensayos de campo para validar el sistema en conjunto. Por último, evaluando los resultados de las pruebas de campo, se analizaron las mejoras necesarias en la captura de datos ambientales y envolvente de los nodos sensores.

El trabajo realizado en este artículo, permitió la validación de la propuesta desarrollo de una red no supervisada de sensores asistida por dron para la monitorización marina. Este sistema presenta una alternativa a las implementaciones existentes al momento del estudio. Sus principales ventajas son, la facilidad de despliegue, al no requerir embarcaciones de gran tamaño; un método para extracción de datos de manera remota, sin el uso de comunicaciones vía satélite; y una alternativa económica en tema de implementación y mantenimiento. Esto permite realizar despliegues multipunto en una misma área de interés, proporcionando datos oceanográficos de mayor precisión y resolución que fotografías satelitales o por medio de dron. La implementación de una red de sensores LoRa asistida por dron, presenta una solución viable para la monitorización de entornos marítimos, superando los retos de comunicación inalámbrica mencionados en el capítulo 4.

6.4 Aportaciones a las métricas para el diseño de WSN

En el capítulo 5 se propuso y validó una metodología para el diseño de WSN, con especial énfasis en redes IoT. La motivación de este trabajo se basó en la identificación de una vasta cantidad de métricas en la literatura y una falta de estandarización entre ellas para el desarrollo de estos sistemas; con lo cual resulta difícil trabajar sin tener una serie de directrices bases para su debida implementación.

Las aportaciones principales que se pueden identificar son **la recopilación de métricas de los distintos aspectos que componen una red, la definición de fases de diseño de redes, y la metodología para su implementación en proyectos nuevos o para optimización de sistemas.**

Esto se llevó mediante el análisis de distintos estudios enfocados en el diseño de WSN desde la perspectiva de las prestaciones de dispositivos físicos, las capas de comunicación inalámbrica y los estándares de calidad de transmisión; además de la experiencia adquirida en la realización de sistemas de esta índole. Con esta recopilación de métricas, se realizó una clasificación de estas, se identificaron las de mayor peso dentro del diseño general y se establecieron cuatro fases de diseño donde estas métricas se ven implicadas. Adicionalmente, las fases de diseño conllevan una serie de recomendaciones en cuanto a las actividades que se requieren realizar para la selección del protocolo de

comunicaciones y tecnología del nodo. Por último, esta metodología se ejemplificó en tres escenarios de aplicación supuestos y se aplicaron los análisis necesarios a distintos protocolos de comunicaciones para identificar la tecnología más conveniente y discutir el razonamiento de esto.

La propuesta de metodología realizada en este capítulo se encuentra actualmente en preparación para ser sometida a la revista *Sensors*, buscando la validación de la misma por parte de la comunidad científica.

6.5 Líneas de trabajo a futuro

Las WSN sin duda son uno de los sistemas que mayor influencia han tenido en la sociedad en las últimas décadas, tanto por el volumen de información que proporcionan, como por sus aportaciones a la interpretación de fenómenos sociales y ambientales. Esta tecnología se encuentra en constante evolución y buscando mejoras en distintos aspectos, por lo que las ramas de trabajo a futuro son múltiples.

De manera específica, en cuanto a los sistemas energéticamente autónomos con conectividad IP, resulta claro que las mejoras a la arquitectura central de los dispositivos es un tema de relevancia. Por ello, se continuaría con la evaluación de diseños de bajo consumo que incidan en el microcontrolador y sus periféricos, además de la incorporación de nuevos *transceivers* para este propósito. Esto implicaría una menor necesidad de generación energética, una mejora en la calidad del servicio (incremento de reporte de datos), una inicialización más rápida del nodo y/o la reducción de la capacidad de baterías como fuente de alimentación. Aunado a esto, la integración de *firmware* o metodologías de enrutamiento que brinden inteligencia y conciencia sobre el estado del sistema también son tópicos a investigar. Con esto se buscaría analizar la energía que se está generando, los niveles requeridos y la energía almacenada, en caso de que se tuviera. De esta manera, se podría tomar decisiones de manera autónoma sobre los periodos óptimos de transmisión, identificar las situaciones de falla de captura o envío de datos y en que escenarios requiere suspender actividades para conservar energía. Hoy en día existen estudios que abordan esta temática, como el trabajo de Ruan *et al.* (Ruan, Chew and Zhu, 2017) quienes proponen una WSN donde el microcontrolador es consciente y gestiona la energía de una fuente de *energy harvesting*; Dong *et al.* (Dong *et al.*, 2016) quienes proponen un método de enrutamiento que toma en cuenta la energía de un sistema WSN; o Srbinovski *et al.* (Srbinovski *et al.*, 2016) que desarrollaron un algoritmo para muestreo que modifica el comportamiento del nodo en base a la energía disponible.

Un tema que se podría explorar, sería el análisis de distintos protocolos para los nodos IP. Uno de ellos es el protocolo CoAP (*Constrained Application Protocol*), correspondiente a la capa de aplicación del modelo OSI, diseñado para redes limitadas o

de bajo consumo. Resulta similar a HTTP en el sentido del uso del paradigma *request/response*, sin embargo, es mucho más ligero en tema de gastos de protocolo (Dizdarević *et al.*, 2018).

Otro protocolo es MQTT-SN (*Message Queue Telemetry Transport for Sensor Networks*), diseñado específicamente para dispositivos embebidos e IoT, específicamente sensores y actuadores (Hunkeler, Truong and Stanford-Clark, 2008). Este se basa en el protocolo MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*), una tecnología que se implementa sobre TCP, enfocada a comunicaciones máquina a máquina (M2M) con empaquetados de tamaño reducido y bajo consumo energético (MQTT, 2019). Comparando MQTT y CoAP, CoAP presenta un menor consumo energético, ancho de banda y tamaño de mensaje. Sin embargo, a diferencia de MQTT, MQTT-SN se implementa sobre UDP al igual que CoAP, haciendo el protocolo aún más ligero y de menor consumo energético pero conservando todas las características de QoS de su predecesor. La comparativa de MQTT-SN y CoAP en búsqueda del protocolo más eficiente es un tema de debate dentro de la literatura (Amaran *et al.*, 2015; Gündoğan *et al.*, 2018), por lo que se requiere mayores estudios y evaluaciones a fondo para definir los casos escenarios de aplicación relevantes para cada uno.

En tema de sistemas de monitorización inalámbricos no supervisados para monitorización ambiental, de manera específica a la propuesta realizada, resulta de gran interés el estudio e integración de metodologías de *energy harvesting* a las boyas sensorizadas. La implementación de tecnologías de esta índole en el sistema podría ayudar en la prolongación de vida del sistema o su uso de manera indefinida. Debido al entorno de despliegue, es decir el océano, existe una gran variedad de fuentes de *energy harvesting* capaces de generar energía para el nodo.

El *energy harvesting* solar es el más comúnmente utilizado en aplicaciones marinas, principalmente para recarga de las baterías de las boyas. Este método de *harvesting* la utilizan principalmente boyas que se despliegan en mar abierto, ya que se tiene una fuente de energía constante (Hahn, Morgan and Shafer, 2015; Torres *et al.*, 2015; Corredor, 2018). Una fuente de energía prácticamente perpetua es el movimiento de las olas o corrientes marinas, la cual es capaz de proporcionar magnitudes significativas y estables para dispositivos marítimos. Los métodos de extracción de esta fuente varían, sin embargo, los más comunes son a través de inducción electromagnética y el uso de elementos piezoeléctricos (Scruggs and Jacob, 2009; Hwang *et al.*, 2017; Viet, Wu and Wang, 2017; Xu *et al.*, 2017). Por último, es posible extraer energía térmica principalmente de los gradientes térmicos que se pueden obtener entre las corrientes superficiales y las sub-superficiales (Chao, 2016; Ma *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2018).

Otra área de mejora a futuro es la integración de la WSN con los sistemas de navegación del dron. El objetivo es de brindar al dron con capacidad de decisión con respecto a la información que recibe por parte de las boyas sensorizadas o, de manera

contraria, en la ausencia de información. Por un lado, con la información brindada por las boyas, el dron sería capaz de modificar su patrón de vuelo en casos donde se requiere más tiempo para la transferencia de datos o si hubo corrupción de datos en la transmisión, o saber cuándo enviar información a los usuarios sobre el estatus de boyas que presenten problemas. En el caso donde el dron no encuentra boyas en el área de interés, el dron podría configurar el nodo maestro con parámetros LoRa RF de mayor alcance, al igual que las boyas, entrando así en un modo de rescate donde se modifica su patrón de vuelo para cubrir mayor extensión en búsqueda de las boyas perdidas.

Este tipo de integraciones, hasta el conocimiento del autor, no han sido realizadas directamente en sistemas WSN asistidos por dron; sin embargo, un antecedente de esto se puede apreciar en la gran mayoría de drones comerciales, los cuentan con la capacidad de interpretar la información adquirida de sus diversos sensores o cámaras para la toma de decisiones en casos de emergencia o para protección del usuario (DJI, 2019).

En tema de metodología de WSN, la propuesta realizada presenta un marco de referencia para estandarizar el diseño de estos sistemas; sin embargo, aún existe un largo camino para lograr este objetivo. Como primer paso a futuro es la publicación de esta misma y lograr su aplicación en casos reales, con lo cual se pueda obtener retroalimentación de la comunidad científica para su mejora. Posteriormente, se buscaría ahondar aún más en las fases de diseño avanzada y detallada principalmente, ya que existen gran cantidad de métricas que se pueden considerar para estas etapas, tal y como muestra Yuan *et al.* (Yuan, Kanhere and Hollick, 2017). Para esta primera propuesta solo se seleccionaron las de mayor impacto en el diseño, como se menciona en el capítulo 5, sin embargo, para lograr una debida estandarización es necesario ampliar el espectro y cubrir todas las métricas validadas en la literatura. Este trabajo requeriría un esfuerzo considerable, puesto que muchos estudios se utilizan las mismas métricas para interpretar diversos rasgos de una red en sus distintas capas del modelo OSI. Aunado a esto, de manera constante se siguen proponiendo nuevas métricas para el análisis de WSN, por lo que la metodología tendría que evolucionar a un ritmo similar de estas nuevas propuestas, una vez que se consideren válidas entre la comunidad científica.

Bibliografía

- Abouzied, M. A., Ravichandran, K. and Sanchez-Sinencio, E. (2017) 'A Fully Integrated Reconfigurable Self-Startup RF Energy-Harvesting System With Storage Capability', *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 52(3), pp. 704–719. doi: 10.1109/JSSC.2016.2633985.
- Aburukba, R. *et al.* (2016a) 'Configurable ZigBee-based control system for people with multiple disabilities in smart homes', in *2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems, CIICS 2016*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICCSII.2016.7462435.
- Aburukba, R. *et al.* (2016b) 'Configurable ZigBee-based control system for people with multiple disabilities in smart homes', in *2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems, CIICS 2016*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICCSII.2016.7462435.
- Adafruit (2019) *Anemometer Wind Speed Sensor w/Analog Voltage Output ID: 1733*. Available at: <https://www.adafruit.com/product/1733> (Accessed: 15 February 2019).
- Adame, T. *et al.* (2018) 'CUIDATS: An RFID–WSN hybrid monitoring system for smart health care environments', *Future Generation Computer Systems*. North-Holland, 78, pp. 602–615. doi: 10.1016/j.future.2016.12.023.
- Adelantado, F. *et al.* (2017) 'Understanding the Limits of LoRaWAN', *IEEE Communications Magazine*, 55(9), pp. 34–40. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- Ahlers, D. *et al.* (2016) 'A measurement-driven approach to understand urban greenhouse gas emissions in Nordic cities', in. Norsk Informatikkonferanse 2016.
- Akbas, A. *et al.* (2016) 'Joint Optimization of Transmission Power Level and Packet Size for WSN Lifetime Maximization', *IEEE Sensors Journal*, 16(12), pp. 5084–5094. doi: 10.1109/JSEN.2016.2548661.
- Akeela, R. and Elziq, Y. (2017) 'Design and verification of IEEE 802.11ah for IoT and M2M applications', in *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*. IEEE, pp. 491–496. doi: 10.1109/PERCOMW.2017.7917612.

- Akhtar, F. and Rehmani, M. H. (2015) 'Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 45, pp. 769–784. doi: 10.1016/J.RSER.2015.02.021.
- Al-Kashoash, H. A. A. and Kemp, A. H. (2016) 'Comparison of 6LoWPAN and LPWAN for the Internet of Things', *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*. Taylor & Francis, 13(4), pp. 268–274. doi: 10.1080/1448837X.2017.1409920.
- Alazzawi, L. and Elkateeb, A. (2008) 'Performance Evaluation of the WSN Routing Protocols Scalability', *Journal of Computer Systems, Networks, and Communications*. Hindawi, 2008, pp. 1–9. doi: 10.1155/2008/481046.
- Ali, H., Soe, J. K. and Weller, S. R. (2015) 'A real-time ambient air quality monitoring wireless sensor network for schools in smart cities', in *2015 IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISC2.2015.7366163.
- Almamou, A. A. B. *et al.* (2009) 'Performance evaluation of routing protocols in a Real-World WSN', in *2009 Global Information Infrastructure Symposium*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/GIIS.2009.5307052.
- Amaran, M. H. *et al.* (2015) 'A Comparison of Lightweight Communication Protocols in Robotic Applications', *Procedia Computer Science*. Elsevier, 76, pp. 400–405. doi: 10.1016/J.PROCS.2015.12.318.
- Amri, S. *et al.* (2017) 'A new fuzzy logic based node localization mechanism for Wireless Sensor Networks', *Future Generation Computer Systems*, 10 November. doi: 10.1016/j.future.2017.10.023.
- Anadiotis, A. C. G., Morabito, G. and Palazzo, S. (2016) 'An SDN-Assisted Framework for Optimal Deployment of MapReduce Functions in WSNs', *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 15(9), pp. 2165–2178. doi: 10.1109/TMC.2015.2496582.
- Analog Devices (2018) *LTC3108 - Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager*. Available at: <https://www.analog.com/en/products/ltc3108.html> (Accessed: 22 November 2018).
- Anand, A. *et al.* (2015) 'Retrofit control solutions for old buildings using WSN', in *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*. IEEE, pp. 59–63. doi: 10.1109/I4CT.2015.7219537.
- Andreadou, N., Guardiola, M. and Fulli, G. (2016) 'Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications', *Energies*, 9(5), p. 375. doi: 10.3390/en9050375.
- Angular (2019) *Angular Framework*. Available at: <https://angular.io/> (Accessed: 15 February 2019).
- Anupriya K *et al.* (2016) 'Integrating ZigBee and Sub GHz devices for long range networks', in *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/GET.2016.7916826.
- Aref, M. and Sikora, A. (2014) 'Free space range measurements with Semtech LoRa technology', in *2014 2nd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*,

- IDAACS-SWS 2014*, pp. 19–23. doi: 10.1109/IDAACS-SWS.2014.6954616.
- Arndt, J. *et al.* (2017) 'Development of a 6LoWPAN sensor node for IoT based home automation networks', in *2017 International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*. IEEE, pp. 1–4. doi: 10.1109/REM.2017.8075226.
- Asensio, A. *et al.* (2015) 'Wireless Sensor Networks in traffic management systems', in *Proceedings of the 6th International Conference on Applied Informatics and Computing Theory*. Salerno, Italy, pp. 60–68.
- Asensio, Á. *et al.* (2013) 'Hardware architecture design for WSN runtime extension', *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. doi: 10.1155/2013/136745.
- Asensio, Á. (2016) *Contribuciones a La Interoperabilidad Y a La Optimización Energética En El Diseño De Dispositivos Para La Internet De Las Cosas*.
- Aslan, Y. E., Korpeoglu, I. and Ulusoy, Ö. (2012) 'A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring', *Computers, Environment and Urban Systems*. Elsevier Ltd, 36(6), pp. 614–625. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2012.03.002.
- Asociación Española de Repartidores de Costes de Calefacción (2019) *Medición y reparto de consumos en instalaciones centralizadas por columna*. Available at: <http://www.aercca.es/reparticion.asp> (Accessed: 15 February 2019).
- Azmi, N. and Kamarudin, L. M. (2017) 'Enabling IoT: Integration of wireless sensor network for healthcare application using Waspote', in *AIP Conference Proceedings*, p. 020010. doi: 10.1063/1.4975243.
- Babayo, A. A., Anisi, M. H. and Ali, I. (2017) 'A Review on energy management schemes in energy harvesting wireless sensor networks', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 76, pp. 1176–1184. doi: 10.1016/J.RSER.2017.03.124.
- Barac, F., Gidlund, M. and Zhang, T. (2015) 'Ubiquitous, Yet Deceptive: Hardware-Based Channel Metrics on Interfered WSN Links', *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(5), pp. 1766–1778. doi: 10.1109/TVT.2014.2334494.
- Baranov, A. M. *et al.* (2018) 'Feasibility of RF energy harvesting for wireless gas sensor nodes', *Sensors and Actuators A: Physical*. Elsevier, 275, pp. 37–43. doi: 10.1016/J.SNA.2018.03.026.
- Barbatei, R., Skavhaug, A. and Johansen, T. A. (2015) 'Acquisition and relaying of data from a floating wireless sensor node using an Unmanned Aerial Vehicle', *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2015*, pp. 677–686. doi: 10.1109/ICUAS.2015.7152350.
- Bartoli, A. *et al.* (2011) 'Low-power low-rate goes long-range: The case for secure and cooperative machine-to-machine communications', *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6827 LNCS, pp. 219–230. doi: 10.1007/978-3-642-23041-7_21.
- BCC Research (2016) *Wireless Sensors: Technologies and Global Markets*.
- BeagleBoard (2019) *BeagleBone Black*. Available at: <https://beagleboard.org/black> (Accessed: 15 February 2019).

- Bendig, J., Bolten, A. and Bareth, G. (2012) 'Introducing a Low-Cost Mini-UAV for Thermal and Multispectral Imaging', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXII ISPRS Congress, XXXIX-B1, pp. 345–349. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-345-2012.
- Bera, S. *et al.* (2018) 'Soft-WSN: Software-Defined WSN Management System for IoT Applications', *IEEE Systems Journal*, 12(3), pp. 2074–2081. doi: 10.1109/JSYST.2016.2615761.
- Bertino, E. (2016) 'Data privacy for IoT systems: Concepts, approaches, and research directions', in *2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. IEEE, pp. 3645–3647. doi: 10.1109/BigData.2016.7841030.
- Beutel, J. (2006) 'Metrics for Sensor Network Platforms', *Proceedings ACM Workshop on RealWorld Wireless Sensor Networks REALWSN 06*, (August), pp. 26–30.
- Bevan, E. *et al.* (2015) 'Unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring sea turtles in near-shore waters', *Marine Turtle Newsletter*, 145(145), pp. 19–22. doi: 0839-7708.
- Bhargava, K. *et al.* (2017) 'Fog-enabled WSN system for animal behavior analysis in precision dairy', in *2017 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC 2017*. IEEE, pp. 504–510. doi: 10.1109/ICCNC.2017.7876180.
- Bhatt, A. and Patoliya, J. (2016) 'Cost effective digitization of home appliances for home automation with low-power WiFi devices', in *Proceeding of IEEE - 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics, IEEE - AEEICB 2016*. IEEE, pp. 643–648. doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538368.
- Bilbao, J. (2017) 'Developing the IoT through Wireless Communication Networks: Analysis of Topologies', *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*, 3(4). doi: 10.15406/ijbsbe.2017.03.00075.
- Blanckenstein, J. *et al.* (2015) 'Error characterization of multi-access point WSNs in an aircraft cabin', in *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop, ICCW 2015*, pp. 2363–2368. doi: 10.1109/ICCW.2015.7247534.
- Bosch (2019) *BME280 - Integrated Environmental Unit*. Available at: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme280 (Accessed: 15 February 2019).
- Botteron, C. *et al.* (2016) 'A low-cost UWB sensor node powered by a piezoelectric harvester or solar cells', *Sensors and Actuators A: Physical*. Elsevier, 239, pp. 127–136. doi: 10.1016/J.SNA.2016.01.011.
- Boubrima, A., Bechkit, W. and Rivano, H. (2017) 'Optimal WSN Deployment Models for Air Pollution Monitoring', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16(5), pp. 2723–2735. doi: 10.1109/TWC.2017.2658601.
- Brito, J. *et al.* (2014) 'An intelligent home automation control system based on a novel heat pump and Wireless Sensor Networks', in *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. IEEE, pp. 1448–1453. doi: 10.1109/ISIE.2014.6864827.
- Brun-Laguna, K. *et al.* (2016) 'A demo of the PEACH IoT-based frost event prediction system

- for precision agriculture', in *2016 13th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking, SECON 2016*. IEEE, pp. 1–3. doi: 10.1109/SAHCN.2016.7732963.
- Bukhari, S. H. R., Siraj, S. and Rehmani, M. H. (2018) 'NS-2 based simulation framework for cognitive radio sensor networks', *Wireless Networks*. Springer US, 24(5), pp. 1543–1559. doi: 10.1007/s11276-016-1418-5.
- Burghardt, F. L. *et al.* (2014) 'A Design Methodology for Energy Harvesting: With a Case Study on the Structured Development of a System to Power a Condition Monitoring Unit', *Energy Harvesting and Systems*, 1(1–2), pp. 101–112. doi: 10.1515/ehs-2013-0001.
- Bushinsky, S. M. *et al.* (2016) 'Accurate oxygen measurements on modified argo floats using in situ air calibrations', *Limnology and Oceanography: Methods*, 14(8), pp. 491–505. doi: 10.1002/lom3.10107.
- Calgary (2018) *Smart city story: Long range, low power technology*. The City of Calgary. Available at: <http://www.calgary.ca/General/Pages/SmartCity/LoRaWAN.aspx> (Accessed: 17 February 2019).
- Cao-hoang, T. and Duy, C. N. (2017) 'Environment monitoring system for agricultural application based on wireless sensor network', in *2017 Seventh International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*. IEEE, pp. 99–102. doi: 10.1109/ICIST.2017.7926499.
- Chao, Y. (2016) 'Autonomous underwater vehicles and sensors powered by ocean thermal energy', in *OCEANS 2016 - Shanghai*. IEEE, pp. 1–4. doi: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485367.
- Chen, C.-P., Chuang, C.-L. and Jiang, J.-A. (2013) 'Ecological Monitoring Using Wireless Sensor Networks—Overview, Challenges, and Opportunities', in Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–21. doi: 10.1007/978-3-642-32180-1_1.
- Chen, Y. *et al.* (2016) 'Energy-Autonomous Wireless Communication for Millimeter-Scale Internet-of-Things Sensor Nodes', *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(12), pp. 3962–3977. doi: 10.1109/JSAC.2016.2612041.
- Chéour, R. *et al.* (2017) 'Evaluation of simulator tools and power-aware scheduling model for wireless sensor networks', *IET Computers & Digital Techniques*. Institution of Electrical Engineers, 11(5), pp. 173–182. doi: 10.1049/iet-cdt.2017.0003.
- Chottirapong, K. *et al.* (2015) 'Design of energy harvesting thermoelectric generator with wireless sensors in organic fertilizer plant', in *2015 6th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICTEmSys.2015.7110823.
- Chouikhi, S. *et al.* (2015) 'A survey on fault tolerance in small and large scale wireless sensor networks', *Computer Communications*. Elsevier, 69, pp. 22–37. doi: 10.1016/J.COMCOM.2015.05.007.
- Combs, G. (2018) *Wireshark*. Available at: <https://www.wireshark.org/> (Accessed: 26 November 2018).
- Cooking hacks (2019) *Waterproof Temperature Sensor - DS18B20*. Available at:

<https://www.cooking-hacks.com/temperature-sensor-waterproof-ds18b20>
(Accessed: 15 February 2019).

- Corredor, J. E. (2018) 'Platforms for Coastal Ocean Observing', in *Coastal Ocean Observing*. Cham: Springer International Publishing, pp. 67–84. doi: 10.1007/978-3-319-78352-9_3.
- Correia, L. H. A. and Nogueira, J. M. S. (2008) 'Transmission power control techniques for MAC protocols in wireless sensor networks', in *NOMS 2008 - IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium: Pervasive Management for Ubiquitous Networks and Services*. Elsevier, pp. 1049–1054. doi: 10.1109/NOMS.2008.4575277.
- Davis Instruments (2019) *Vantage Pro 2*. Available at: <https://www.davisinstruments.com/solution/vantage-pro2/> (Accessed: 15 February 2019).
- Day, J. D. and Zimmermann, H. (1983) 'The OSI reference model', *Proceedings of the IEEE*, 71(12), pp. 1334–1340. doi: 10.1109/PROC.1983.12775.
- Desai, N. V., Ramadass, Y. and Chandrakasan, A. P. (2014) 'A bipolar ± 40 MV self-starting boost converter with transformer reuse for thermoelectric energy harvesting', in *Proceedings of the 2014 international symposium on Low power electronics and design - ISLPED '14*. New York, New York, USA: ACM Press, pp. 221–226. doi: 10.1145/2627369.2627609.
- Dey, N. *et al.* (2017) 'Developing residential wireless sensor networks for ECG healthcare monitoring', *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 63(4), pp. 442–449. doi: 10.1109/TCE.2017.015063.
- Dizdarević, J. *et al.* (2018) 'A Survey of Communication Protocols for Internet of Things and Related Challenges of Fog and Cloud Computing Integration', *ACM Computing Surveys*, 51(6), pp. 1–29. doi: 10.1145/3292674.
- DJI (2019) *Guidance: Un sistema de percepción visual revolucionario para plataformas aéreas - DJI*. Available at: <https://www.dji.com/mx/guidance> (Accessed: 22 February 2019).
- DMR (2019) *60 Interesting Fitbit Statistics and Facts*. Available at: <https://expandedramblings.com/index.php/fitbit-statistics/> (Accessed: 16 February 2019).
- Dominguez-Morales, J. P. *et al.* (2016) 'Wireless Sensor Network for Wildlife Tracking and Behavior Classification of Animals in Doñana', *IEEE Communications Letters*, 20(12), pp. 2534–2537. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2612652.
- Dong, Y. *et al.* (2016) 'DEARER: A Distance-and-Energy-Aware Routing With Energy Reservation for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks', *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(12), pp. 3798–3813. doi: 10.1109/JSAC.2016.2621378.
- Dressler, F. *et al.* (2016) 'From radio telemetry to ultra-low-power sensor networks: tracking bats in the wild', *IEEE Communications Magazine*, 54(1), pp. 129–135. doi: 10.1109/MCOM.2016.7378438.

- Dyo, V. *et al.* (2012) 'WILDSENSING: Design and deployment of a sustainable sensor network for wildlife monitoring', *ACM Transactions on Sensor Networks*, 8(4), pp. 1–33. doi: 10.1145/2240116.2240118.
- Edwards-Murphy, F. *et al.* (2016) 'b+WSN: Smart beehive with preliminary decision tree analysis for agriculture and honey bee health monitoring', *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier, 124, pp. 211–219. doi: 10.1016/J.COMPAG.2016.04.008.
- Erdelj, M., Natalizio, E. and Akyildiz, I. F. (2017) 'Help from the Sky: Leveraging UAVs for Disaster Management', *IEEE Pervasive Computing*, 16(1), pp. 24–32.
- Esmaeili, M. and Jamali, S. (2015) 'IoT based Scheduling for Energy Saving in a Wireless Ecosystem', *CiiT International Journal of Wireless Communication*, 7(10), pp. 329–333.
- Fadhullah, S. Y. and Ismail, W. (2015) 'Solar energy harvesting design framework for 3.3 V small and low-powered devices in wireless sensor network', in *2015 1st International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)*. IEEE, pp. 89–94. doi: 10.1109/TAFGEN.2015.7289583.
- Fang, B. *et al.* (2016) 'BodyScan: Enabling Radio-based Sensing on Wearable Devices for Contactless Activity and Vital Sign Monitoring', in *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services - MobiSys '16*. New York, New York, USA: ACM Press, pp. 97–110. doi: 10.1145/2906388.2906411.
- Faria, M. *et al.* (2014) 'Coordinating UAVs and AUVs for oceanographic field experiments: Challenges and lessons learned', in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, pp. 6606–6611. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907834.
- Farooq, M. U. *et al.* (2015) 'A Critical Analysis on the Security Concerns of Internet of Things (IoT)', *International Journal of Computer Applications*, 111(7).
- FeiyuTech (2019a) *FY-605 Data Radio*. Available at: <http://www.feiyu-tech.com/fy-605-data-radio/> (Accessed: 15 February 2019).
- FeiyuTech (2019b) *Panda II Autopilot System*. Available at: <http://www.feiyu-tech.com/panda2/> (Accessed: 23 February 2017).
- Fitbit (2019) *Fitbit - monitores de actividad*. Available at: <https://www.fitbit.com/mx/home> (Accessed: 16 February 2019).
- FLIR Systems (2019) *FLIR ONE Gen 1*. Available at: <https://www.flir.com/support/products/flir-one-gen-1#Specifications> (Accessed: 15 February 2019).
- Folea, S. C. and Mois, G. (2015) 'A Low-Power Wireless Sensor for Online Ambient Monitoring', *IEEE Sensors Journal*, 15(2), pp. 742–749. doi: 10.1109/JSEN.2014.2351420.
- FreeRTOS (2019) *Free professionally developed and robust real time operating system for small embedded systems development*. Available at: <https://www.freertos.org/RTOS.html> (Accessed: 15 February 2019).
- Fremantle, P. (2015) *A Reference Architecture for the Internet of Things*. Available at:

<http://wso2.com/whitepapers/a-reference-architecture-for-the-internet-of-things/>
(Accessed: 15 February 2019).

- Froiz-Míguez, I. *et al.* (2018) 'Design, Implementation and Practical Evaluation of an IoT Home Automation System for Fog Computing Applications Based on MQTT and ZigBee-WiFi Sensor Nodes', *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 18(8), p. 2660. doi: 10.3390/s18082660.
- Gaglione, A. *et al.* (2018) 'Energy Neutral Operation of Vibration Energy-Harvesting Sensor Networks for Bridge Applications', *International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN)*.
- Gehlot, A. *et al.* (2016) 'IoT and Zigbee based Street Light Monitoring System with LabVIEW', *International Journal of Sensor and Its Applications for Control Systems*, 4(2), pp. 1–8. doi: 10.14257/ijcsacs.2016.4.2.01.
- Georgiou, K., Xavier-De-Souza, S. and Eder, K. (2018) 'The IoT Energy Challenge: A Software Perspective', *IEEE Embedded Systems Letters*, 10(3), pp. 53–56. doi: 10.1109/LES.2017.2741419.
- Ghahramani, M. H., Zhou, M. and Hon, C. T. (2017) 'Toward cloud computing QoS architecture: analysis of cloud systems and cloud services', *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 4(1), pp. 6–18. doi: 10.1109/JAS.2017.7510313.
- Ghayvat, H. *et al.* (2015) 'WSN- and IOT-Based Smart Homes and Their Extension to Smart Buildings', *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 15(5), pp. 10350–10379. doi: 10.3390/s150510350.
- Gor, M. *et al.* (2017) 'GATA: GPS-Arduino based Tracking and Alarm system for protection of wildlife animals', in *2017 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*. IEEE, pp. 166–170. doi: 10.1109/CITS.2017.8035325.
- Gordon, L. (2017) *Recommendations for Reports About Argo Float Batteries*.
- Govindan, K. and Azad, A. P. (2015) 'End-to-end service assurance in IoT MQTT-SN', in *2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. IEEE, pp. 290–296. doi: 10.1109/CCNC.2015.7157991.
- Guan, M. *et al.* (2017) 'Design and experimental investigation of a low-voltage thermoelectric energy harvesting system for wireless sensor nodes', *Energy Conversion and Management*. Pergamon, 138, pp. 30–37. doi: 10.1016/j.enconman.2017.01.049.
- Guerra Santin, O. (2011) 'Behavioural Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating', *Energy and Buildings*. Elsevier B.V., 43(10), pp. 2662–2672. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.06.024.
- Guerra Santin, O., Itard, L. and Visscher, H. (2009) 'The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock', *Energy and Buildings*, 41(11), pp. 1223–1232. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.07.002.
- Gündoğan, C. *et al.* (2018) 'NDN, CoAP, and MQTT: A Comparative Measurement Study in the IoT'. doi: 10.1145/3267955.3267967.
- Gunduzalp, E., Yildirim, G. and Tatar, Y. (2015) 'Determination of General Parameters of

- WSNs Designed for 3-D Closed Environments', *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 3(4). doi: 10.17694/bajece.64249.
- Hahn, G. G., Morgan, E. R. and Shafer, M. W. (2015) 'A Sub-Surface Model of Solar Power for Distributed Marine Sensor Systems', in *Volume 2: Integrated System Design and Implementation; Structural Health Monitoring; Bioinspired Smart Materials and Systems; Energy Harvesting*. ASME, p. V002T07A023. doi: 10.1115/SMASIS2015-9121.
- Han, B. *et al.* (2013) 'Harvesting energy from vibrations of the underlying structure', *Journal of Vibration and Control*. SAGE PublicationsSage UK: London, England, 19(15), pp. 2255–2269. doi: 10.1177/1077546313501537.
- Han, J. *et al.* (2014) 'Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC', *2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 60(2), pp. 544–545. doi: 10.1109/ICCE.2014.6776125.
- Hannan, M. A. *et al.* (2014) 'Energy harvesting for the implantable biomedical devices: issues and challenges', *BioMedical Engineering OnLine*. BioMed Central, 13(1), p. 79. doi: 10.1186/1475-925X-13-79.
- Harderback (2019) *Seahorse SE120*. Available at: <https://www.harderback.com/Maletas-Industriales/se120-protective-case/> (Accessed: 15 February 2019).
- Harish Kumar, B. (2017) 'WSN based Automatic Irrigation and Security System using Raspberry Pi Board', in *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)*. IEEE, pp. 1097–1103. doi: 10.1109/CTCEEC.2017.8455140.
- Heywhatsthat (2019) *HeyWhatsThat Path Profiler*. Available at: <http://www.heywhatsthat.com/profiler.html> (Accessed: 15 February 2019).
- Hlaing, W. *et al.* (2017) 'Implementation of WiFi-based single phase smart meter for Internet of Things (IoT)', in *2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*. IEEE, pp. 1–4. doi: 10.1109/IEECON.2017.8075793.
- Hodgson, A., Kelly, N. and Peel, D. (2013) 'Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying Marine Fauna: A dugong case study', *PLoS ONE*, 8(11). doi: 10.1371/journal.pone.0079556.
- Hung, F. H. *et al.* (2017) 'Packet error rate analysis in IoT for industrial air conditioning system', in *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, pp. 8367–8370. doi: 10.1109/IECON.2017.8217469.
- Hunkeler, U., Truong, H. L. and Stanford-Clark, A. (2008) 'MQTT-S — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks', in *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08)*. IEEE, pp. 791–798. doi: 10.1109/COMSWA.2008.4554519.
- Hwang, W. S. *et al.* (2017) 'Design of piezoelectric ocean-wave energy harvester using sway movement', *Sensors and Actuators A: Physical*. Elsevier, 260, pp. 191–197. doi: 10.1016/j.sna.2017.04.026.
- Iacono, L. *et al.* (2017) 'WSNs Data and Configuration Management in Sensor Clouds with Cloud File Synchronization Services', *Journal of Computer Science & Technology*,

17(1), pp. 1–11.

- IEEE Standards Associations (2016) *IEEE 802.15.4-2015 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*. Available at: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2015.html (Accessed: 16 February 2019).
- IEEE Standards Associations (2018) *P802.11bb - Standard for Information Technology--Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks--Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifica*. Available at: https://standards.ieee.org/project/802_11bb.html (Accessed: 16 February 2019).
- Ingenu (2016) *Ingenu and WellAware Announce Machine Network Expansion*. Available at: <http://www.ingenu.com/2016/01/ingenu-and-wellaware-announce-machine-network-expansion/> (Accessed: 16 February 2019).
- Instituto Nacional de Estadística (2011) 'Censos de Población y Viviendas 2011 Datos detallados Principales resultados Principales indicadores Tamaño del hogar'.
- International Electrotechnical Commission (2016) *IoT 2020: Smart and Secure IoT Platform*. International Electrotechnical Commission. Available at: <https://books.google.com.mx/books?id=aItwAQACAAJ>.
- Intven, H., Oliver, J. and Sepúlveda, E. (2018) 'Overview of Telecommunications Regulation', in *Telecommunications Regulation Handbook*. Cham: Springer International Publishing, p. 1.1-1.26. doi: 10.1007/978-3-319-75844-2_12.
- Inzillo, V. and De Rango, F. (2016) 'A directional mac approach extending omnet++ simulator', in *Simulation Series*. Society for Computer Simulation International, p. 479.
- J. Yuh (2000) 'Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey', *Kluwer Academic Publishers*, 8, pp. 7–24. doi: 10.1023/A:1008984701078.
- Jang, W. S. and Healy, W. M. (2010) 'Wireless sensor network performance metrics for building applications', *Energy and Buildings*. Elsevier, 42(6), pp. 862–868. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2009.12.008.
- Janssen, T. *et al.* (2018) 'Outdoor Fingerprinting Localization Using Sigfox', in *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/IPIN.2018.8533826.
- Jindal, V. (2018) 'History and Architecture of Wireless Sensor Networks for Ubiquitous Computing', *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*, 7(2), pp. 2278–1323.
- Jurenoks, A. and Novickis, L. (2017) 'Analysis of wireless sensor network structure and life time affecting factors', in *2017 9th International Scientific Conference on Communication and Information Technologies, KIT 2017 - Proceedings*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.23919/KIT.2017.8109448.
- Katona, R. *et al.* (2016) 'Challenges in supporting diverse applications in a shared WSN: The Motley middleware', in *2016 27th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISSC.2016.7528474.
- Kaur, K., Kaur, P. and Singh, E. S. (2014) 'Wireless Sensor Network: Architecture, Design

- Issues and Applications', *International Journal of Scientific Engineering and Research*, 2(11), pp. 6–10.
- Kelly, S. D. T., Suryadevara, N. K. and Mukhopadhyay, S. C. (2013) 'Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes', *IEEE Sensors Journal*, 13(10), pp. 3846–3853. doi: 10.1109/JSEN.2013.2263379.
- Khan, R. *et al.* (2012) 'Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges', *Proceedings - 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2012*, pp. 257–260. doi: 10.1109/FIT.2012.53.
- Khan, W. Z., Saad, N. M. and Aalsalem, M. Y. (2012) 'An overview of evaluation metrics for routing protocols in wireless sensor networks', in *2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012)*. IEEE, pp. 588–593. doi: 10.1109/ICIAS.2012.6306083.
- Khanafer, M., Al-Anbagi, I. and Mouftah, H. T. (2017) 'An Optimized WSN Design for Latency-Critical Smart Grid Applications', *Journal of Sensors*. Hindawi, 2017, pp. 1–8. doi: 10.1155/2017/5274715.
- Kim, H. *et al.* (2018) 'Towards the optimal operation of a thermal-recharging float in the ocean', *Ocean Engineering*. Pergamon, 156, pp. 381–395. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2018.02.043.
- Kirubasri, G. and Uma Maheswari, N. (2016) 'A Study on Hardware and Software Link Quality Metrics for Wireless Multimedia Sensor Networks', *Int. J. Advanced Networking and Applications*, pp. 3103–3109.
- Kishore Kumar Reddy N. G. and Rajeshwari K. (2017) 'Interactive clothes based on IOT using NFC and Mobile Application', in *2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. IEEE, pp. 1–4. doi: 10.1109/CCWC.2017.7868339.
- Kong, H.-B. *et al.* (2016) 'Exact Performance Analysis of Ambient RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks With Ginibre Point Process', *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(12), pp. 3769–3784. doi: 10.1109/JSAC.2016.2621360.
- Kulau, U. *et al.* (2016) 'Undervolting in Real World WSN Applications: A Long-Term Study', in *2016 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. IEEE, pp. 9–16. doi: 10.1109/DCOSS.2016.15.
- Kumar, S. and Lee, S. R. (2014) 'Android based smart home system with control via Bluetooth and internet connectivity', in *The 18th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE 2014)*. IEEE, pp. 1–2. doi: 10.1109/ISCE.2014.6884302.
- Kuo, Y.-W. and Li, C.-L. (2016) 'Design of long range low power sensor node for the last mile of IoT', in *2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*. IEEE, pp. 1–2. doi: 10.1109/ICCE-TW.2016.7520961.
- Lambrechts, J. and Sinha, S. (2016) 'Population Growth in Developing Countries and Smart City Fundamentals. The Internet-of-Things and Wireless Sensor Networks', in. Springer, Cham, pp. 29–62. doi: 10.1007/978-3-319-28358-6_2.

- Lang, S. B. (2005) 'Pyroelectricity: From Ancient Curiosity to Modern Imaging Tool', *Physics Today*, 58(8), pp. 31–36. doi: 10.1063/1.2062916.
- Lee, J.-S., Dong, M.-F. and Sun, Y.-H. (2015) 'A preliminary study of low power wireless technologies: ZigBee and Bluetooth Low Energy', in *2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, pp. 135–139. doi: 10.1109/ICIEA.2015.7334098.
- Lee, Y., Blaauw, D. and Sylvester, D. (2016) 'Ultralow Power Circuit Design for Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring', *Proceedings of the IEEE*, 104(8), pp. 1529–1546. doi: 10.1109/JPROC.2016.2547946.
- Levis, P. *et al.* (2003) 'TOSSIM', in *Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems - SenSys '03*. New York, USA: ACM Press, p. 126. doi: 10.1145/958491.958506.
- Lhermet, H. *et al.* (2007) 'Efficient Power Management Circuit: Thermal Energy Harvesting to Above-IC Microbattery Energy Storage', in *2007 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers*. IEEE, pp. 62–587. doi: 10.1109/ISSCC.2007.373588.
- Lin, P. *et al.* (2018) 'Characteristics and dynamics of wind-driven upwelling in the Alaskan Beaufort Sea based on six years of mooring data', *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. Pergamon. doi: 10.1016/J.DSR2.2018.01.002.
- LinkLabs (2017) *The Past, Present, & Future of LPWAN*. Available at: <https://www.link-labs.com/blog/past-present-future-lpwan> (Accessed: 11 August 2018).
- Llaria, A. *et al.* (2015) 'Geolocation and monitoring platform for extensive farming in mountain pastures', in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, pp. 2420–2425. doi: 10.1109/ICIT.2015.7125454.
- LoRa Alliance (2015) *LoRaWAN - What is it?* Available at: <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf> (Accessed: 11 August 2018).
- LoRa Alliance (2017) 'LoRaWAN 1.0.2 Regional Parameters', (Feb), pp. 1–55.
- Lovett, G. M. *et al.* (2007) 'Who needs environmental monitoring?', *Frontiers in Ecology and the Environment*. Wiley-Blackwell, 5(5), pp. 253–260. doi: 10.1890/1540-9295(2007)5[253:WNEM]2.0.CO;2.
- Lu, W. *et al.* (2018) 'Collaborative Energy and Information Transfer in Green Wireless Sensor Networks for Smart Cities', *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), pp. 1585–1593. doi: 10.1109/TII.2017.2777846.
- Lukas, Tanumihardja, W. A. and Gunawan, E. (2015) 'On the application of IoT: Monitoring of troughs water level using WSN', *2015 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe)*, pp. 58–62. doi: 10.1109/ICWISE.2015.7380354.
- Lukas, Tanumihardja, W. A. and Gunawan, E. (2016) 'On the application of IoT: Monitoring of troughs water level using WSN', in *2015 IEEE Conference on Wireless Sensors, ICWiSe 2015*. IEEE, pp. 58–62. doi: 10.1109/ICWISE.2015.7380354.
- Lumpkin, R. and Johnson, G. C. (2013) 'Global ocean surface velocities from drifters: Mean, variance, El Niño-Southern Oscillation response, and seasonal cycle', *Journal of*

- Geophysical Research: Oceans*. Wiley-Blackwell, 118(6), pp. 2992–3006. doi: 10.1002/jgrc.20210.
- Ma, H.-D. (2011) 'Internet of Things: Objectives and Scientific Challenges', *Journal of Computer Science and Technology*, 26(6), pp. 919–924. doi: 10.1007/s11390-011-1189-5.
- Ma, Z. *et al.* (2016) 'Ocean thermal energy harvesting with phase change material for underwater glider', *Applied Energy*. Elsevier, 178, pp. 557–566. doi: 10.1016/J.APENERGY.2016.06.078.
- Manville, C. *et al.* (2014) 'Mapping Smart Cities in the EU', *RAND*, p. 200.
- Mao, Y., Zhao, Z. and Jia, X. (2011) 'Understanding the indoor interference between IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b/g via measurements', in *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/WCSP.2011.6096857.
- Martinez, B. *et al.* (2015) 'The Power of Models: Modeling Power Consumption for IoT Devices', 15(10), pp. 5777–5789.
- Maslow, A. H. (1943) 'A theory of human motivation', *Psychological Review*, 50(4), pp. 370–396. doi: 10.1037/h0054346.
- Mathur, P. *et al.* (2014) 'Wildlife conservation and rail track monitoring using wireless sensor networks', in *2014 4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE)*. IEEE, pp. 1–4. doi: 10.1109/VITAE.2014.6934504.
- Meshkova, E. *et al.* (2008) 'Service-oriented design methodology for wireless sensor networks: A view through case studies', *Proceedings - IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*, pp. 146–153. doi: 10.1109/SUTC.2008.43.
- Microchip (2017) *RN2483*. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002346C.pdf> (Accessed: 16 February 2019).
- Microchip (2019a) *MRF24WB0MA*. Available at: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70632C.pdf> (Accessed: 15 February 2019).
- Microchip (2019b) *PIC24FJ128GC006 - 16-Bit - Microcontrollers and Digital Signal Controllers*. Available at: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC24FJ128GC006> (Accessed: 15 February 2019).
- Microchip (2019c) *PIC24FJ256GA106 16-bit Microcontrollers*. Available at: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC24FJ256GA106> (Accessed: 15 February 2019).
- Microchip (2019d) *RN4020 - Bluetooth Module*. Available at: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN4020> (Accessed: 15 February 2019).
- Mihajlovic, Z. *et al.* (2015) 'Energy harvesting wireless sensor node for monitoring of surface

- water', in *2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/IConAC.2015.7313997.
- Minhas, U. I. *et al.* (2018) 'A WSN for Monitoring and Event Reporting in Underground Mine Environments', *IEEE Systems Journal*, 12(1), pp. 485–496. doi: 10.1109/JSYST.2016.2644109.
- Ministerio de la Presidencia - Relaciones con las Cortes e Igualdad (2014) *Boletín oficial del estado - Medidas urgentes*. Available at: <https://www.boe.es/boe/dias/2014/07/05/pdfs/BOE-A-2014-7064.pdf>.
- Molina-Pico, A. *et al.* (2016a) 'Forest Monitoring and Wildland Early Fire Detection by a Hierarchical Wireless Sensor Network', *Journal of Sensors*. Hindawi, 2016, pp. 1–8. doi: 10.1155/2016/8325845.
- Molina-Pico, A. *et al.* (2016b) 'Forest Monitoring and Wildland Early Fire Detection by a Hierarchical Wireless Sensor Network', *Journal of Sensors*, 2016, pp. 1–8. doi: 10.1155/2016/8325845.
- Moravejosharieh, A. and Lloret, J. (2016) 'A survey of IEEE 802.15.4 effective system parameters for wireless body sensor networks', *International Journal of Communication Systems*. John Wiley & Sons, Ltd, 29(7), pp. 1269–1292. doi: 10.1002/dac.3098.
- Morillo, P. *et al.* (2018a) 'Comparison of WSN and IoT approaches for a real-time monitoring system of meal distribution trolleys: A case study', *Future Generation Computer Systems*. North-Holland, 87, pp. 242–250. doi: 10.1016/j.future.2018.01.032.
- Morillo, P. *et al.* (2018b) 'Comparison of WSN and IoT approaches for a real-time monitoring system of meal distribution trolleys: A case study', *Future Generation Computer Systems*. North-Holland, 87, pp. 242–250. doi: 10.1016/J.FUTURE.2018.01.032.
- MQTT (2019) *FAQ - Frequently Asked Questions | MQTT*. Available at: <http://mqtt.org/faq> (Accessed: 22 February 2019).
- Mukherjee, M. *et al.* (2018) 'Energy trading in sleep scheduling for wireless rechargeable WSNs', in *2018 10th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*. IEEE, pp. 429–431. doi: 10.1109/COMSNETS.2018.8328235.
- Munir, A., Antoon, J. and Gordon-Ross, A. (2015) 'Modeling and Analysis of Fault Detection and Fault Tolerance in Wireless Sensor Networks', *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 14(1), pp. 1–43. doi: 10.1145/2680538.
- Nadeem, Q. *et al.* (2013) 'M-GEAR: Gateway-Based Energy-Aware Multi-hop Routing Protocol for WSNs', in *2013 Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*. IEEE, pp. 164–169. doi: 10.1109/BWCCA.2013.35.
- Nagaraju, S. *et al.* (2016) 'RSSI based indoor localization with interference avoidance for Wireless Sensor Networks using anchor node with sector antennas', in *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2016*. IEEE, pp. 2233–2237. doi: 10.1109/WiSPNET.2016.7566539.

- Nair, P. and Sharma, S. (2017) 'Smart City: A Failed Approach to Urban Regeneration for Indian Cities', *Ssrn*, LV(11). doi: 10.2139/ssrn.2929205.
- Nakagawa, K., Kobayashi, H. and Sezaki, K. (2014) 'Carrier Pigeon-Like Sensing System: Animal-Computer Interface Design for Opportunistic Data Exchange Interaction for a Wildlife Monitoring Application', in *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference on - AH '14*. New York, New York, USA: ACM Press, pp. 1–2. doi: 10.1145/2582051.2582078.
- National Electrical Manufacturers Association (2019) *American National Standard for Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)*. Available at: <https://www.nema.org/Standards/Pages/American-National-Standard-for-Degrees-of-Protection-Provided-by-Enclosures.aspx> (Accessed: 15 February 2019).
- National Instruments (2019a) *LabVIEW System Design Software*. Available at: <http://www.ni.com/labview/> (Accessed: 15 February 2019).
- National Instruments (2019b) *NI USB-6009*. Available at: <http://www.ni.com/es-mx/support/model.usb-6009.html> (Accessed: 16 February 2019).
- Nechibvute, A. *et al.* (2017) 'RADIO FREQUENCY ENERGY HARVESTING SOURCES', *Acta Electrotechnica et Informatica*, 17(4), pp. 19–27. doi: 10.15546/aei-2017-0030.
- Nguyen, M. S. and Le-Trung, Q. (2014) 'Low-power and cost-effective wifi sensor motes for wireless embedded Internet applications', in *International Conference on Advanced Technologies for Communications*. IEEE, pp. 441–445. doi: 10.1109/ATC.2014.7043428.
- NOAA (2019a) *National Data Buoy Center*. Available at: <https://www.ndbc.noaa.gov/> (Accessed: 16 February 2019).
- NOAA (2019b) *PhOD- Global Drifter Program*. Available at: <http://www.aoml.noaa.gov/phod/gdp/index.php> (Accessed: 15 February 2019).
- Nugroho, E. and Sahroni, A. (2014) 'ZigBee and Wifi Network Interface on Wireless Sensor Networks', (November), pp. 54–58.
- Ocean Exploration and Research-NOAA (2019a) *Submersibles: Deep Discoverer*. Available at: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/deep-discoverer/deep-discoverer.html> (Accessed: 15 February 2019).
- Ocean Exploration and Research-NOAA (2019b) *Submersibles: Hercules ROV*. Available at: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/hercules/hercules.html> (Accessed: 15 February 2019).
- OpenPicus (2019) *Flyport WiFi*. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/OpenPicus> (Accessed: 16 February 2019).
- Orfei, F., Benedetta Mezzetti, C. and Cottone, F. (2017) 'Vibrations powered LoRa sensor: An electromechanical energy harvester working on a real bridge', in *Proceedings of IEEE Sensors*. IEEE, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808752.
- OSGi Alliance (2019) *OSGi™ Alliance – The Dynamic Module System for Java*. Available at: <https://www.osgi.org/> (Accessed: 15 February 2019).
- Osse, T. J. *et al.* (2015) 'The PRAWLER, a vertical profiler powered by wave energy', in

OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington. IEEE, pp. 1–8. doi: 10.23919/OCEANS.2015.7404354.

- Palaniswami, M., Rao, A. S. and Bainbridge, S. (2017) 'Real-time Monitoring of the Great Barrier Reef Using Internet of Things with Big Data Analytics', *ITU Journal: ICT Discoveries*, (1), p. 10.
- Paller, G. and Éló, G. (2016) 'Power consumption considerations of an agricultural camera sensor with image processing capability', in *2nd International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumental Advances (SEIA' 2016)*, pp. 22–23.
- Panousopoulou, A., Azkune, M. and Tsakalides, P. (2016) 'Feature selection for performance characterization in multi-hop wireless sensor networks', *Ad Hoc Networks*. Elsevier, 49, pp. 70–89. doi: 10.1016/j.adhoc.2016.06.011.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2012) *Directiva 2012/27/UE del parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética*, *Diario Oficial de la Unión Europea*.
- Pavan, A. C. (2018) 'A Survey of Z-wave Wireless Sensor Network Technology', *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 1(1), pp. 556–560.
- Peng, J. and Chen, Y. (2015) 'A low energy consumption WSN node', *International Journal of Embedded Systems*, 7(3/4), p. 318. doi: 10.1504/IJES.2015.072362.
- Petajajarvi, J. *et al.* (2016) 'Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring', *International Symposium on Medical Information and Communication Technology, ISMICT*, 2016–June(November). doi: 10.1109/ISMICT.2016.7498898.
- Petrov, V. *et al.* (2018) 'Vehicle-Based Relay Assistance for Opportunistic Crowdsensing Over Narrowband IoT (NB-IoT)', *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), pp. 3710–3723. doi: 10.1109/JIOT.2017.2670363.
- Pico Technology (2019) *TC-08 Thermocouple data logger*. Available at: <https://www.picotech.com/data-logger/tc-08/thermocouple-data-logger> (Accessed: 15 February 2019).
- Pughat, A. and Sharma, V. (2015) 'A review on stochastic approach for dynamic power management in wireless sensor networks', *Human-centric Computing and Information Sciences*. SpringerOpen, 5(1), p. 4. doi: 10.1186/s13673-015-0021-6.
- Rainville, L. and Pinkel, R. (2001) 'Wirewalker: An autonomous wave-powered vertical profiler', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18(6), pp. 1048–1051. doi: 10.1175/1520-0426(2001)018<1048:WAAWPV>2.0.CO;2.
- Raspberry Pi (2019) *Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi*. Available at: <https://www.raspberrypi.org/> (Accessed: 1 October 2018).
- Ratasuk, R. *et al.* (2016) 'NB-IoT system for M2M communication', in *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/WCNC.2016.7564708.
- Raza, U., Kulkarni, P. and Sooriyabandara, M. (2017a) 'Low Power Wide Area Networks: An Overview', *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 19(2), pp. 855–873. doi:

10.1109/COMST.2017.2652320.

- Raza, U., Kulkarni, P. and Sooriyabandara, M. (2017b) 'Low Power Wide Area Networks: An Overview', *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), pp. 855–873. doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- Raza Zaidi, S. A. *et al.* (2015) 'Solar energy empowered 5G cognitive metro-cellular networks', *IEEE Communications Magazine*, 53(7), pp. 70–77. doi: 10.1109/MCOM.2015.7158268.
- Reda, H. T. *et al.* (2017) 'On the Application of IoT: Meteorological Information Display System Based on LoRa Wireless Communication', *IETE Technical Review*. Taylor & Francis, 35(3), pp. 1–10. doi: 10.1080/02564602.2017.1279988.
- Reina, D. G. *et al.* (2015) 'A Survey on Multihop Ad Hoc Networks for Disaster Response Scenarios', *International Journal of Distributed Sensor Networks*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 2015, pp. 1–16. doi: 10.1155/2015/647037.
- Reyes-Guerrero, J. C. *et al.* (2011) 'Wireless Communications for marine sensor networks', pp. 1–4.
- Rizwan, P., Suresh, K. and Babu, M. R. (2016) 'Real-time smart traffic management system for smart cities by using Internet of Things and big data', in *2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT)*. IEEE, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICETT.2016.7873660.
- Rizzi, M. *et al.* (2017) 'Evaluation of the IoT LoRaWAN Solution for Distributed Measurement Applications', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 66(12), pp. 3340–3349. doi: 10.1109/TIM.2017.2746378.
- Rocher, J. *et al.* (2018) 'Design and deployment of a WSN for water turbidity monitoring in fish farms', in *Proceedings - WMNC 2017: 10th Wireless and Mobile Networking Conference*. IEEE, pp. 1–7. doi: 10.1109/WMNC.2017.8248854.
- Rodríguez, S. *et al.* (2015) 'Multi-Agent Information Fusion System to manage data from a WSN in a residential home', *Information Fusion*. Elsevier, 23, pp. 43–57. doi: 10.1016/J.INFFUS.2014.03.003.
- Rowe, D. M. (1999) *Thermoelectrics, an environmentally-friendly source of electrical power, Renewable Energy*. CRC Press. doi: 10.1016/S0960-1481(98)00512-6.
- Ruan, T., Chew, Z. J. and Zhu, M. (2017) 'Energy-Aware Approaches for Energy Harvesting Powered Wireless Sensor Nodes', *IEEE Sensors Journal*, 17(7), pp. 2165–2173. doi: 10.1109/JSEN.2017.2665680.
- Saida, M. *et al.* (2016) 'Improvement of energy harvested from the heat of the human body', in *2016 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*. IEEE, pp. 132–137. doi: 10.1109/STA.2016.7952072.
- Sajjad, S. M., Bouk, S. H. and Yousaf, M. (2015) 'Neighbor Node Trust based Intrusion Detection System for WSN', *Procedia Computer Science*. Elsevier, 63, pp. 183–188. doi: 10.1016/J.PROCS.2015.08.331.
- Salam, H. A. and Khan, B. M. (2016) 'IWSN - Standards, challenges, and the future', *IEEE Potentials*, pp. 9–16.

- Salayma, M. *et al.* (2017) 'Wireless Body Area Network (WBAN)', *ACM Computing Surveys*. ACM, 50(1), pp. 1–38. doi: 10.1145/3041956.
- Sanchis-Cano, A. *et al.* (2017) 'Economic Feasibility of Wireless Sensor Network-Based Service Provision in a Duopoly Setting with a Monopolist Operator', *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 17(12), p. 2727. doi: 10.3390/s17122727.
- Scruggs, J. and Jacob, P. (2009) 'Harvesting Ocean Wave Energy', *Science*, 323(5918), pp. 1176–1178. doi: 10.1126/science.1168245.
- Semtech-Corporation (2013) 'AN1200.13: LoRa Modem Design Guide - SX1272/3/6/7/8', (July), pp. 1–9. Available at: http://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf (Accessed: 28 November 2016).
- Semtech (2013) 'AN1200.17: LoRa Modem Low Energy Consumption Design. Rev. 1', pp. 1–11.
- Semtech (2015a) 'LoRa Modulation Basics - Application note', (May), pp. 1–26. Available at: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>.
- Semtech (2015b) *SX1276/77/78/79 Datasheet*. Available at: http://www.semtech.com/images/datasheet/sx1276_77_78_79.pdf.
- Semtech (2019a) *SX1276 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver / Semtech*. Available at: <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1276/> (Accessed: 15 February 2019).
- Semtech (2019b) *What is LoRa?* Available at: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora> (Accessed: 16 February 2019).
- Semtech Corporation (2015) 'LoRa Modulation Basics', pp. 1–26. Available at: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>.
- SenseFly (2019) *Filling The Gap (Infographic) – Drones vs Other Geospatial Data Sources*. Available at: <http://waypoint.sensefly.com/infographic-geospatial-data-collection-drones-satellite-manned/> (Accessed: 15 February 2019).
- Septiana, R., Soesanti, I. and Setiawan, N. A. (2016) 'Evaluation function effectiveness in Wireless Sensor Network routing using A-star algorithm', in *Proceedings of 2016 4th International Conference on Cyber and IT Service Management, CITSM 2016*. IEEE, pp. 1–5. doi: 10.1109/CITSM.2016.7577519.
- Sethi, P. and Sarangi, S. R. (2017) 'Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications', *Journal of Electrical and Computer Engineering*. Hindawi, pp. 1–25. doi: 10.1155/2017/9324035.
- Shaikh, F. K. and Zeadally, S. (2016a) 'Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 55, pp. 1041–1054. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.010.
- Shaikh, F. K. and Zeadally, S. (2016b) 'Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon, 55, pp. 1041–1054. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.010.

- Shbat, M., Ordaz-Salazar, F. C. and Gonzalez-Salas, J. S. (2018) 'Spectrum Sensing Challenges of IoT Nodes Designed under 5G Network Standards', in *2018 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEEE.2018.8533929.
- Shelke, T. R. and Ingle, K. S. (2017) 'WSN Based Power Management with Automation and Security', *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(6), pp. 3316–3319.
- Shi, C. *et al.* (2017) 'Smart User Authentication through Actuation of Daily Activities Leveraging WiFi-enabled IoT', in *Proceedings of the 18th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing - Mobihoc '17*. New York, New York, USA: ACM Press, pp. 1–10. doi: 10.1145/3084041.3084061.
- Silicon Labs (2013a) *EM351/EM357 datasheet*. Available at: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/EM35x.pdf>.
- Silicon Labs (2013b) *The Evolution of Wireless Sensor Networks*. Available at: <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf> (Accessed: 15 February 2019).
- Silicon Labs (2019) *ETRX3 ZigBee Radio Modules From Telegesis*. Available at: <http://www.telegesis.com/products/etrx3-based-products/etrx3-zigbee-radio-module/> (Accessed: 15 February 2019).
- SIM Com (2019) *SIM928A - GSM/GPRS+GNSS Module*. Available at: <https://cdn.sos.sk/productdata/ca/4b/7626334f/sim928a-1.pdf> (Accessed: 16 February 2019).
- Simbeye, D. S. (2018) *A Wireless Sensor Network Based Solar Powered Harvesting System for Aquaculture*, *Journal of Information Sciences and Computing Technologies*. [s.n.].
- Singh, R. and Verma, A. K. (2017) 'Energy efficient cross layer based adaptive threshold routing protocol for WSN', *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. Urban & Fischer, 72, pp. 166–173. doi: 10.1016/J.AEUE.2016.12.001.
- Snigdha, I. and Gupta, N. (2016) 'Quality of Service Metrics in Wireless Sensor Networks: A Survey', *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*. Springer India, 97(1), pp. 91–96. doi: 10.1007/s40031-014-0160-6.
- Solares, J. R. A. *et al.* (2016) 'Power Minimization of a Wireless Sensor Node Under Different Rate Constraints', *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(13), pp. 3458–3469. doi: 10.1109/TSP.2016.2548991.
- Srbnovski, B. *et al.* (2016) 'An Energy Aware Adaptive Sampling Algorithm for Energy Harvesting WSN with Energy Hungry Sensors', *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 16(4), p. 448. doi: 10.3390/s16040448.
- Sudharsana, J. (2017) 'A Survey on Energy Efficient Sensor Node Design for IoT Applications', *Arumugam International Journal of Computer & Mathematical Sciences IJCMS*, 6(8), pp. 192–194.
- Tektronix (2019a) *DMM4050 and DMM4040*. Available at:

<http://www.tek.com/datasheet/dmm4050-4040-digital-multimeter> (Accessed: 15 February 2019).

- Tektronix (2019b) *DPO2000 and MSO2000 Series Manual*. Available at: <https://www.tek.com/oscilloscope/mso2000-dpo2000-manual/dpo2000-and-mso2000-series> (Accessed: 15 February 2019).
- Teran, M. *et al.* (2017) 'IoT-based system for indoor location using bluetooth low energy', in *2017 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/ColComCon.2017.8088211.
- Terraneo, F., Riccardi, F. and Leva, A. (2018) 'Jitter-Compensated VHT and Its Application to WSN Clock Synchronization', in *Proceedings - Real-Time Systems Symposium*. IEEE, pp. 277–286. doi: 10.1109/RTSS.2017.00033.
- Tiwari, S. V., Sewaiwar, A. and Chung, Y.-H. (2015) 'Smart home technologies using Visible Light Communication', in *2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. IEEE, pp. 379–380. doi: 10.1109/ICCE.2015.7066453.
- Todoli Ferrandis, D., Santonja Climent, S. and Sempere Payaá, V. M. (2012) 'Enabling quick deployment wireless sensor networks for smart cities', in *2012 9th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*. IEEE, pp. 83–86. doi: 10.1109/WFCS.2012.6242547.
- Torres, R. *et al.* (2015) 'Auto-positioning solar panel for harvesting power system in WSN marine buoys', *Instrumentation viewpoint*, 18, pp. 74–74.
- Trasviña-Moreno, C. *et al.* (2017) 'Unmanned Aerial Vehicle Based Wireless Sensor Network for Marine-Coastal Environment Monitoring', *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 17(3), p. 460. doi: 10.3390/s17030460.
- Trasvina-Moreno, C. A. *et al.* (2014) 'WiFi Sensor Networks: A study of energy consumption', in *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14)*. IEEE, pp. 1–6. doi: 10.1109/SSD.2014.6808887.
- Trasviña-Moreno, C. A. *et al.* (2016) 'A Network Performance Analysis of LoRa Modulation for LPWAN Sensor Devices', in *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence*. Springer International Publishing, pp. 174–181. doi: 10.1007/978-3-319-48799-1_21.
- Trasviña-Moreno, C. A. *et al.* (2016) 'Autonomous WiFi Sensor for Heating Systems in the Internet of Things', *Journal of Sensors*, 2016, pp. 1–14. doi: 10.1155/2016/7235984.
- Trasviña Moreno, C. A. *et al.* (2019) 'Evaluation of the LoRa Modulation in the 433 mhz Frequency Band for Outdoor Monitoring', *DYNA New Technologies*, 6(1), pp. 1–10. doi: 10.6036/NT8823.
- Truong, H.-L. and Dustdar, S. (2015) 'Principles for Engineering IoT Cloud Systems', *IEEE Cloud Computing*, 2(2), pp. 68–76. doi: 10.1109/MCC.2015.23.
- Tuna, G. and Das, R. (2015) 'Wireless Sensor Network-Based Health Monitoring System for the Elderly and Disabled', *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCNA)*, 2(6).
- Vangelista, L. (2017) 'Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation', *IEEE Signal Processing Letters*, 24(12), pp. 1818–1821. doi: 10.1109/LSP.2017.2762960.

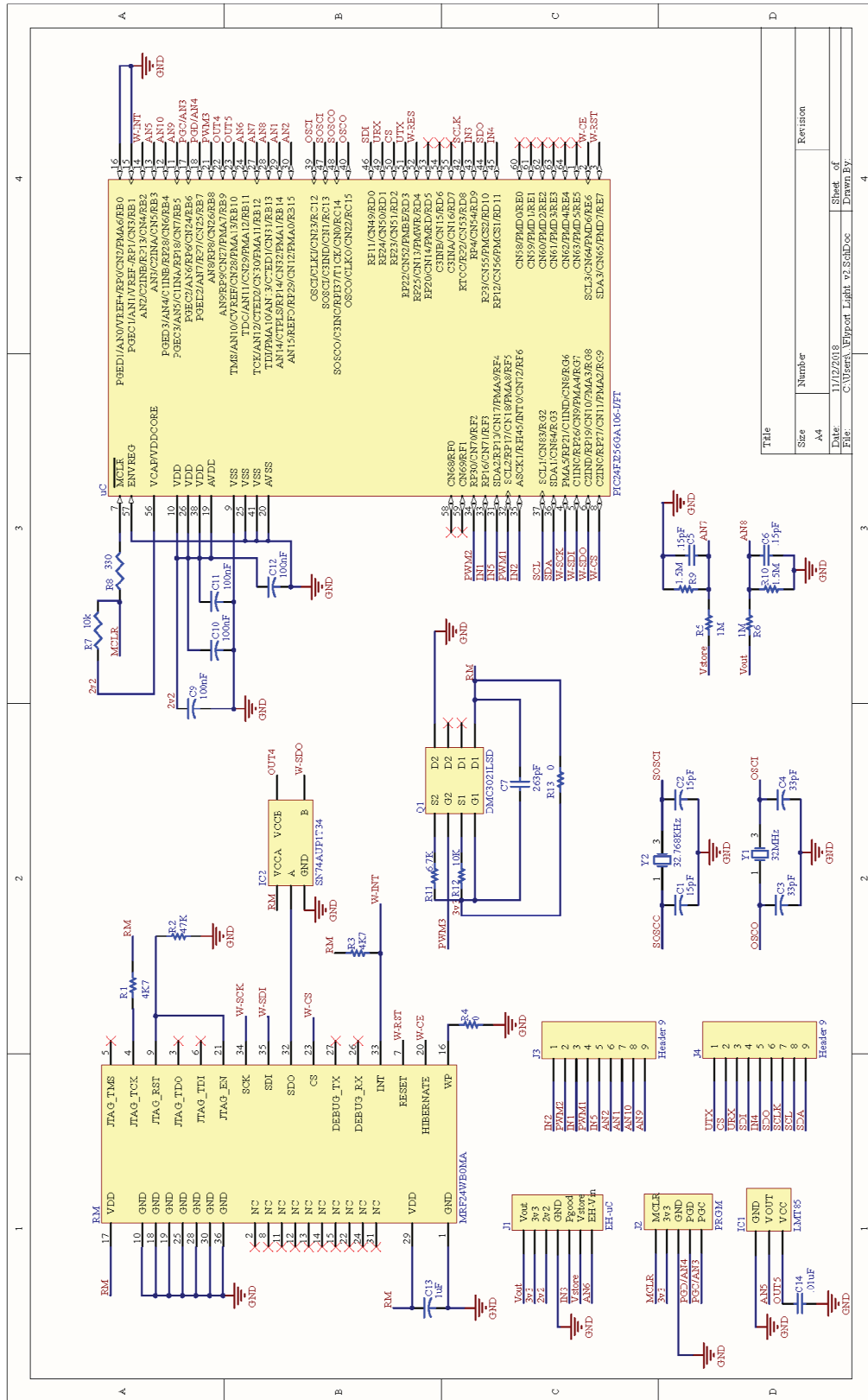
- Verhelst, M. *et al.* (2015) 'A Low-Energy Ultra-Wideband Internet-of-Things Radio System for Multi-Standard Smart-Home Energy Management', *IEEE Transactions on Smart Processing and Computing*, 4(5). doi: 10.5573/IEIESPC.2015.4.5.354.
- Verma, G. and Sharma, V. (2018) 'A Novel Thermoelectric energy harvester for Wireless Sensor Network Application', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1–1. doi: 10.1109/TIE.2018.2863190.
- Viet, N. V, Wu, N. and Wang, Q. (2017) 'A review on energy harvesting from ocean waves by piezoelectric technology', *Journal of Modeling in Mechanics and Materials*. De Gruyter, 1(2). doi: 10.1515/jmmm-2016-0161.
- Visconti, P. *et al.* (2016) 'Development and Characterization of a Solarbased Energy Harvesting and Power Management System for a WSN Node Applied to Optimized Goods Transport and Storage', *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 9(4), pp. 1637–1667. doi: 10.21307/ijssis-2017-933.
- Wang, C. *et al.* (2018) 'Combining Solar Energy Harvesting with Wireless Charging for Hybrid Wireless Sensor Networks', *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 17(3), pp. 560–576. doi: 10.1109/TMC.2017.2732979.
- Wang, H. *et al.* (2015) 'Highly efficient selective metamaterial absorber for high-temperature solar thermal energy harvesting', *Solar Energy Materials and Solar Cells*. North-Holland, 137, pp. 235–242. doi: 10.1016/J.SOLMAT.2015.02.019.
- Wang, H. *et al.* (2018) 'The WSN Monitoring System for Large Outdoor Advertising Boards Based on ZigBee and MEMS Sensor', *IEEE Sensors Journal*, 18(3), pp. 1314–1323. doi: 10.1109/JSEN.2017.2770324.
- Wang, H., Zeng, H. and Wang, P. (2015) 'Clock Skew Estimation of Listening Nodes with Clock Correction upon Every Synchronization in Wireless Sensor Networks', *IEEE Signal Processing Letters*, 22(12), pp. 2440–2444. doi: 10.1109/LSP.2015.2491320.
- Wang, L., Peng, D. and Zhang, T. (2015) 'Design of Smart Home System Based on WiFi Smart Plug', *International Journal of Smart Home*, 9(6), pp. 173–182. doi: 10.14257/ijsh.2015.9.6.19.
- Wang, W. *et al.* (2013) 'Thermoelectric Energy Harvesting for Building Energy Management Wireless Sensor Networks', *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(6), p. 232438. doi: 10.1155/2013/232438.
- Weir, G. E. and US Naval History Center (2006) 'The American Sound Surveillance System: Using the ocean to hunt Soviet submarines, 1950-1961', *International Journal of Naval History*, 5(2).
- Weston, S. (2011) 'An Overview of Environmental Monitoring and its Significance in Resource and Environmental Management', *School of Resource and Environmental Studies, Dalhousie University*.
- Weyn, M. *et al.* (2015) 'DASH7 alliance protocol 1.0: Low-power, mid-range sensor and actuator communication', in *2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. IEEE, pp. 54–59. doi: 10.1109/CSCN.2015.7390420.
- Whitcomb, L. L. (2000) 'Underwater robotics: out of the research laboratory and into

- the\field', *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*. IEEE, 1, pp. 1–8. doi: 10.1109/ROBOT.2000.844135.
- WiFi Alliance (2019) *History of WiFi*. Available at: <https://www.wi-fi.org/who-we-are/history> (Accessed: 12 August 2018).
- Wijesundara, M. *et al.* (2016) 'Design of a Kinetic Energy Harvester for Elephant Mounted Wireless Sensor Nodes of JumboNet', in *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, pp. 1–7. doi: 10.1109/GLOCOM.2016.7841730.
- Woods Hole Oceanographic Institution (2019a) *Floats & Drifters*. Available at: <https://www.whoi.edu/main/instruments/floats-drifters> (Accessed: 15 February 2019).
- Woods Hole Oceanographic Institution (2019b) *History and Background of Moorings and Buoys*. Available at: <http://www.whoi.edu/page.do?pid=10975> (Accessed: 15 February 2019).
- Wu, F. *et al.* (2018) 'WE-Safe: A wearable IoT sensor node for safety applications via LoRa', in *IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2018 - Proceedings*. IEEE, pp. 144–148. doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355234.
- Xu, G., Shen, W. and Wang, X. (2014a) 'Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: a survey', *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14(9), pp. 16932–16954. doi: 10.3390/s140916932.
- Xu, G., Shen, W. and Wang, X. (2014b) 'Marine environment monitoring using Wireless Sensor Networks: A systematic review', *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2014–January(January), pp. 13–18. doi: 10.1109/SMC.2014.6973877.
- Xu, J. *et al.* (2015) 'Animal monitoring with unmanned aerial vehicle-aided wireless sensor networks', in *2015 IEEE 40th Conference on Local Computer Networks (LCN)*. IEEE, pp. 125–132. doi: 10.1109/LCN.2015.7366291.
- Xu, L. *et al.* (2017) 'Integrated triboelectric nanogenerator array based on air-driven membrane structures for water wave energy harvesting', *Nano Energy*. Elsevier, 31, pp. 351–358. doi: 10.1016/j.nanoen.2016.11.037.
- Yan, R., Sun, H. and Qian, Y. (2013) 'Energy-Aware Sensor Node Design With Its Application in Wireless Sensor Networks', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(5), pp. 1183–1191. doi: 10.1109/TIM.2013.2245181.
- Yang, J. *et al.* (2015) 'A Real-Time Monitoring System of Industry Carbon Monoxide Based on Wireless Sensor Networks', *Sensors*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 15(12), pp. 29535–29546. doi: 10.3390/s151129535.
- Yu, X., Weller, P. and Grattan, K. T. V (2015) 'A WSN healthcare monitoring system for elderly people in geriatric facilities', *Digital Healthcare Empowering Europeans*, pp. 567–571. doi: 10.3233/978-1-61499-512-8-567.
- Yuan, D., Kanhere, S. S. and Hollick, M. (2017) 'Instrumenting Wireless Sensor Networks — A survey on the metrics that matter', *Pervasive and Mobile Computing*. Elsevier, pp. 45–62. doi: 10.1016/j.pmcj.2016.10.001.

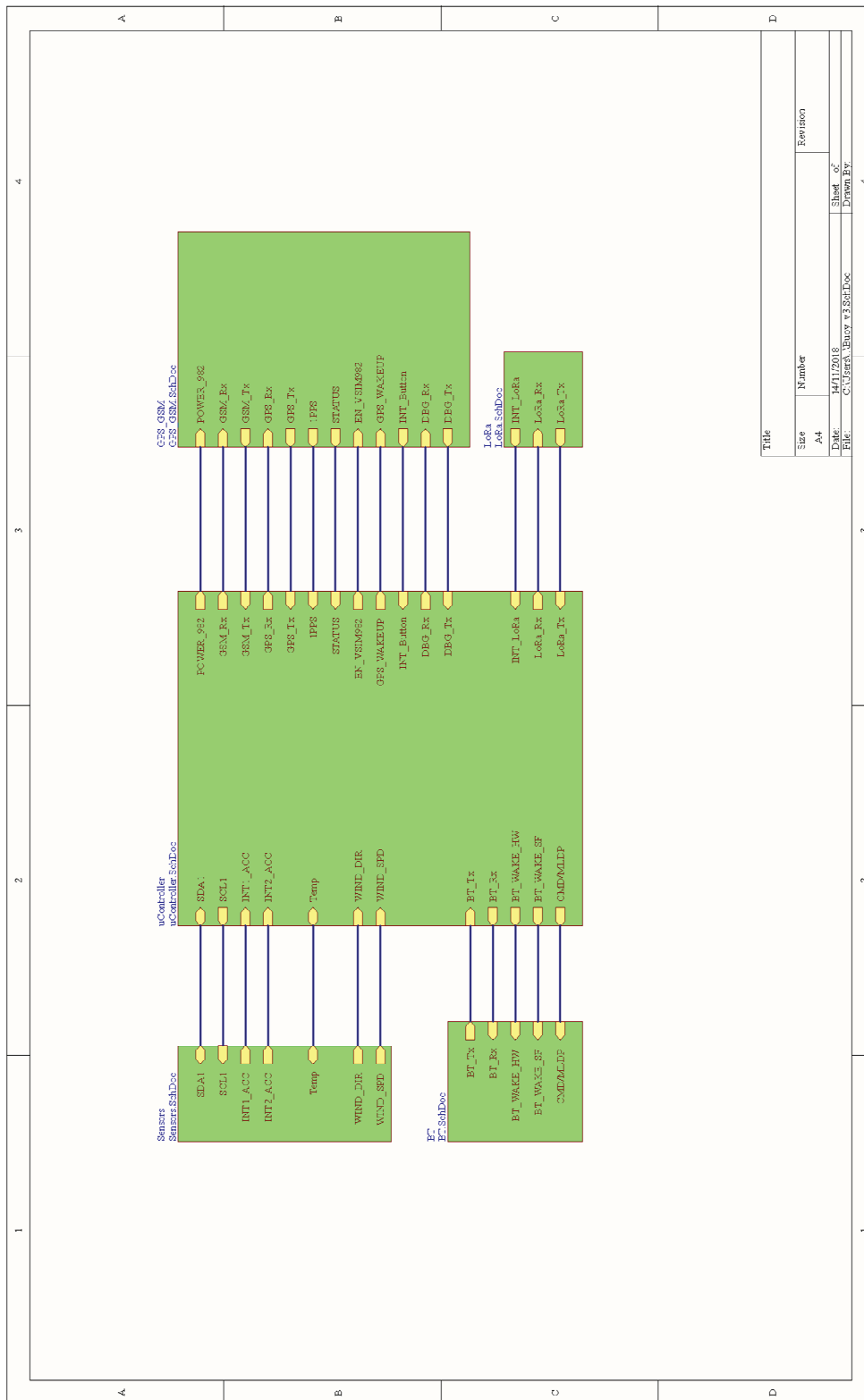
- Zago, M. *et al.* (2011) 'Efficiency analysis of independent and centralized heating systems for residential buildings in Northern Italy', *Energies*, 4(11), pp. 2115–2131. doi: 10.3390/en4112115.
- Zeng, Z. *et al.* (2016) 'A WLAN 2.4-GHz RF energy harvesting system with reconfigurable rectifier for wireless sensor network', *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2016–July, pp. 2362–2365. doi: 10.1109/ISCAS.2016.7539059.
- Zhang, J. *et al.* (2017) 'A rotational piezoelectric energy harvester for efficient wind energy harvesting', *Sensors and Actuators A: Physical*. Elsevier, 262, pp. 123–129. doi: 10.1016/J.SNA.2017.05.027.
- Zhao, Z. *et al.* (2014) 'ZigBee vs WiFi: Understanding issues and measuring performances of their coexistence', in *2014 IEEE 33rd International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*. IEEE, pp. 1–8. doi: 10.1109/PCCC.2014.7017082.
- Zhong, Y. *et al.* (2014) 'Energy-efficient routing control algorithm in large-scale WSN for water environment monitoring with application to three gorges reservoir area', *The Scientific World Journal*. Hindawi, 2014, p. 802915. doi: 10.1155/2014/802915.
- Zhu, C. *et al.* (2016) 'A Novel Sensory Data Processing Framework to Integrate Sensor Networks with Mobile Cloud', *IEEE Systems Journal*, 10(3), pp. 1125–1136. doi: 10.1109/JSYST.2014.2300535.
- Zigbee (2015) *Zigbee PRO*. Available at: <https://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/zigbee-pro/> (Accessed: 11 August 2018).
- ZigBee Standards Organization (2008) *ZigBee Specification*.
- Zolich, A. *et al.* (2016) 'A communication bridge between underwater sensors and unmanned vehicles using a surface wireless sensor network - design and validation', in *OCEANS 2016 - Shanghai*. IEEE, pp. 1–9. doi: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485493.

Anexos

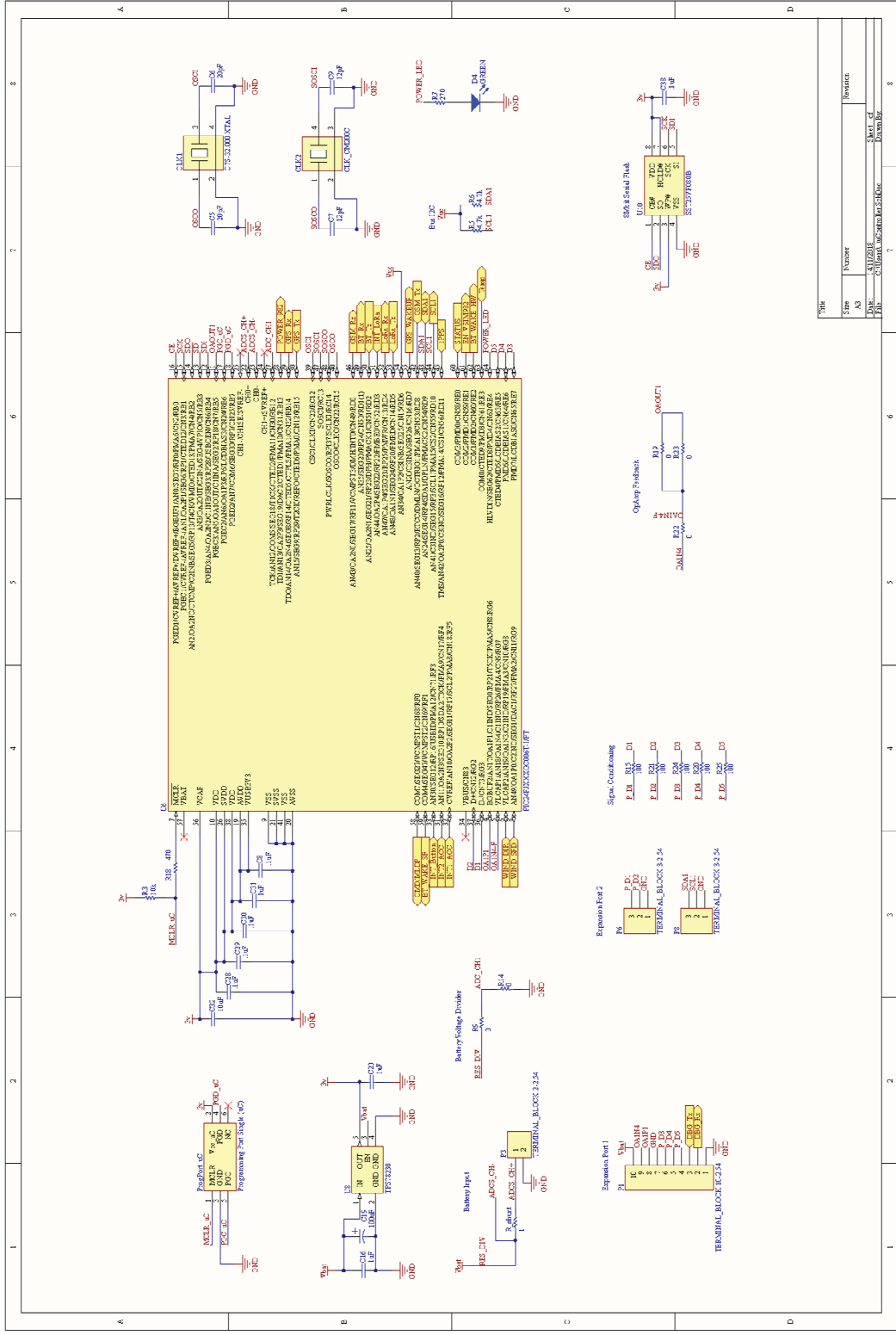
Anexo I: Esquemático nodo autónomo



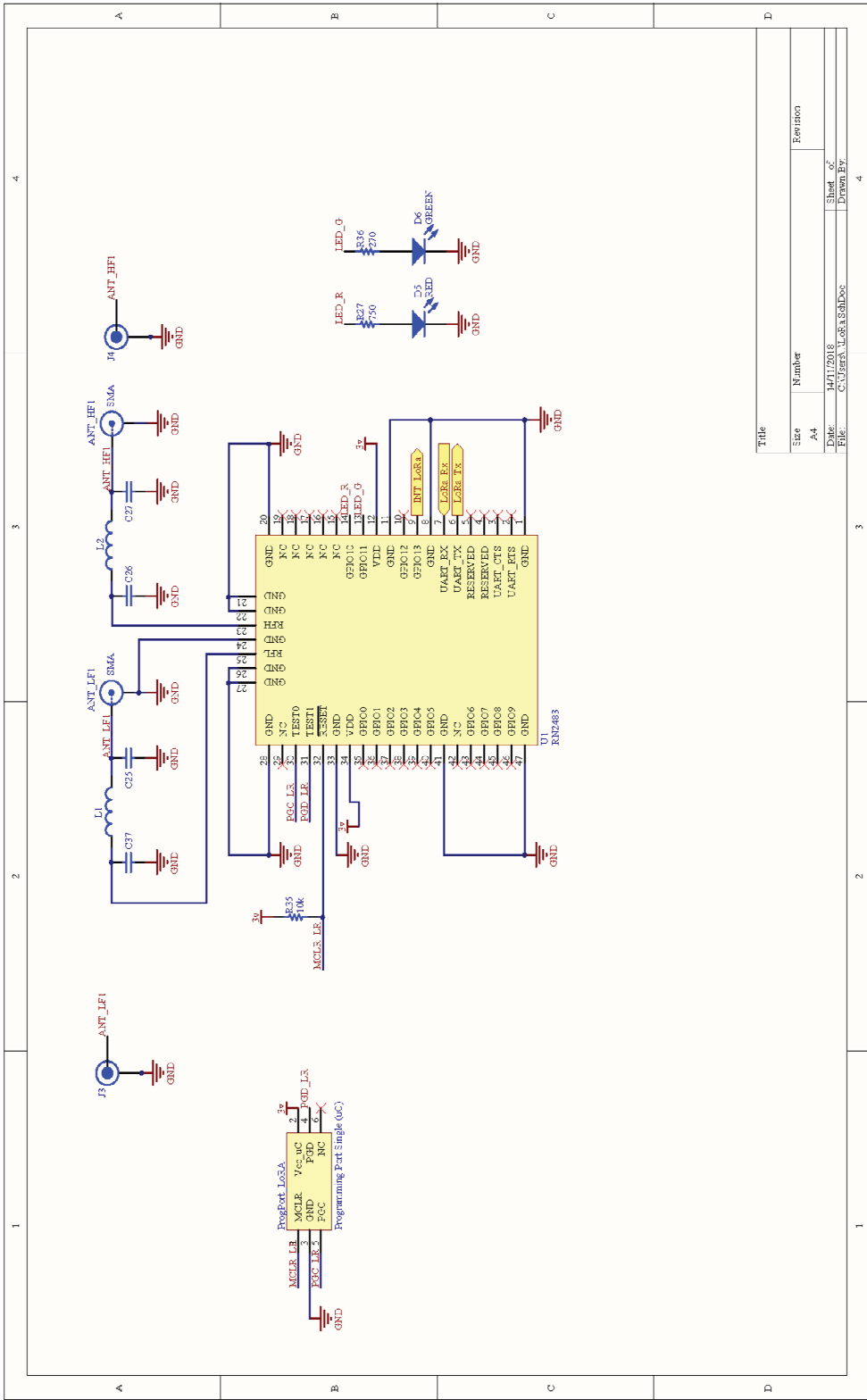
Anexo II: Esquemático sistema no supervisionado

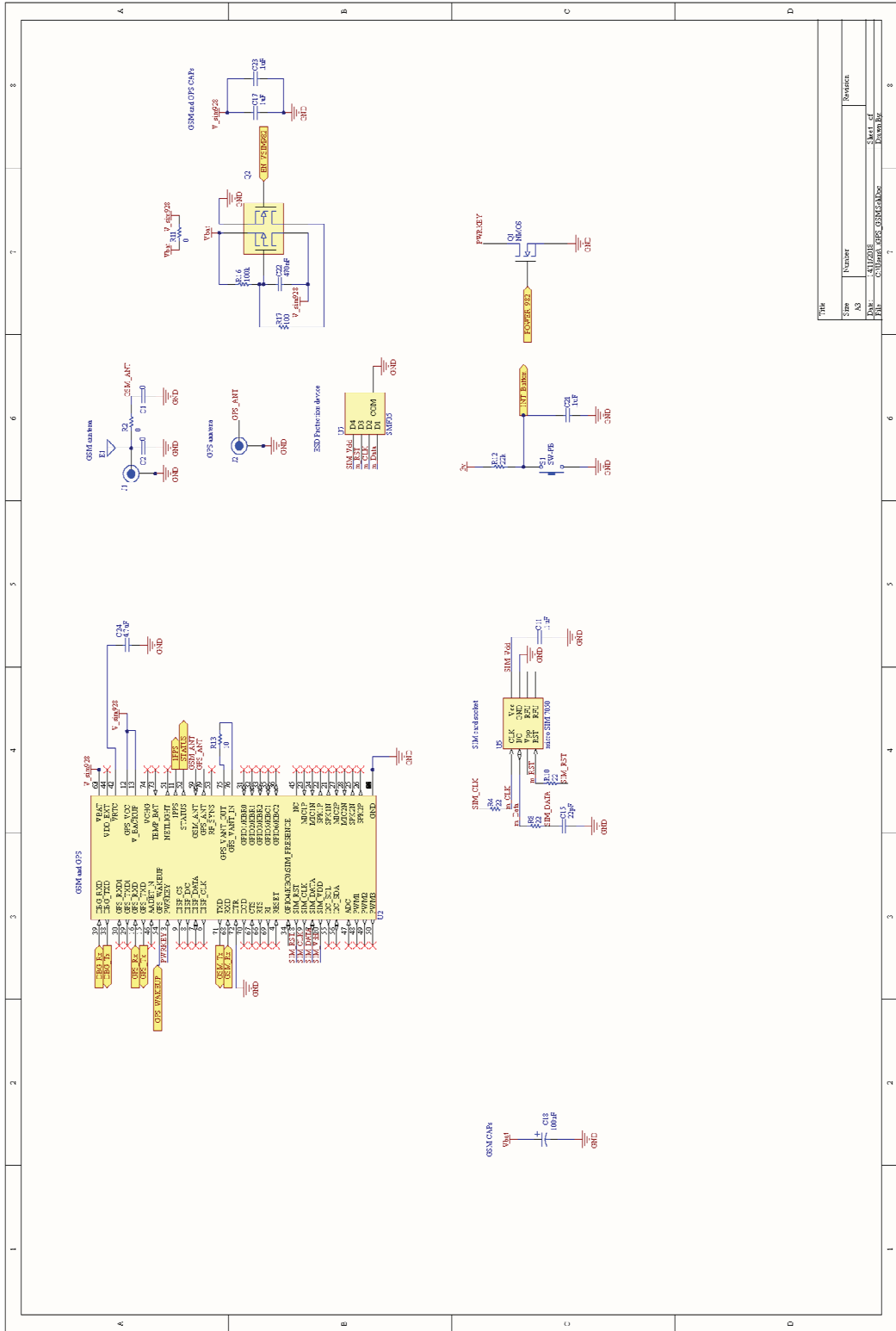


Title	
Size	Number
A4	Revisão
Date:	Sheet of:
File:	Drawn by:

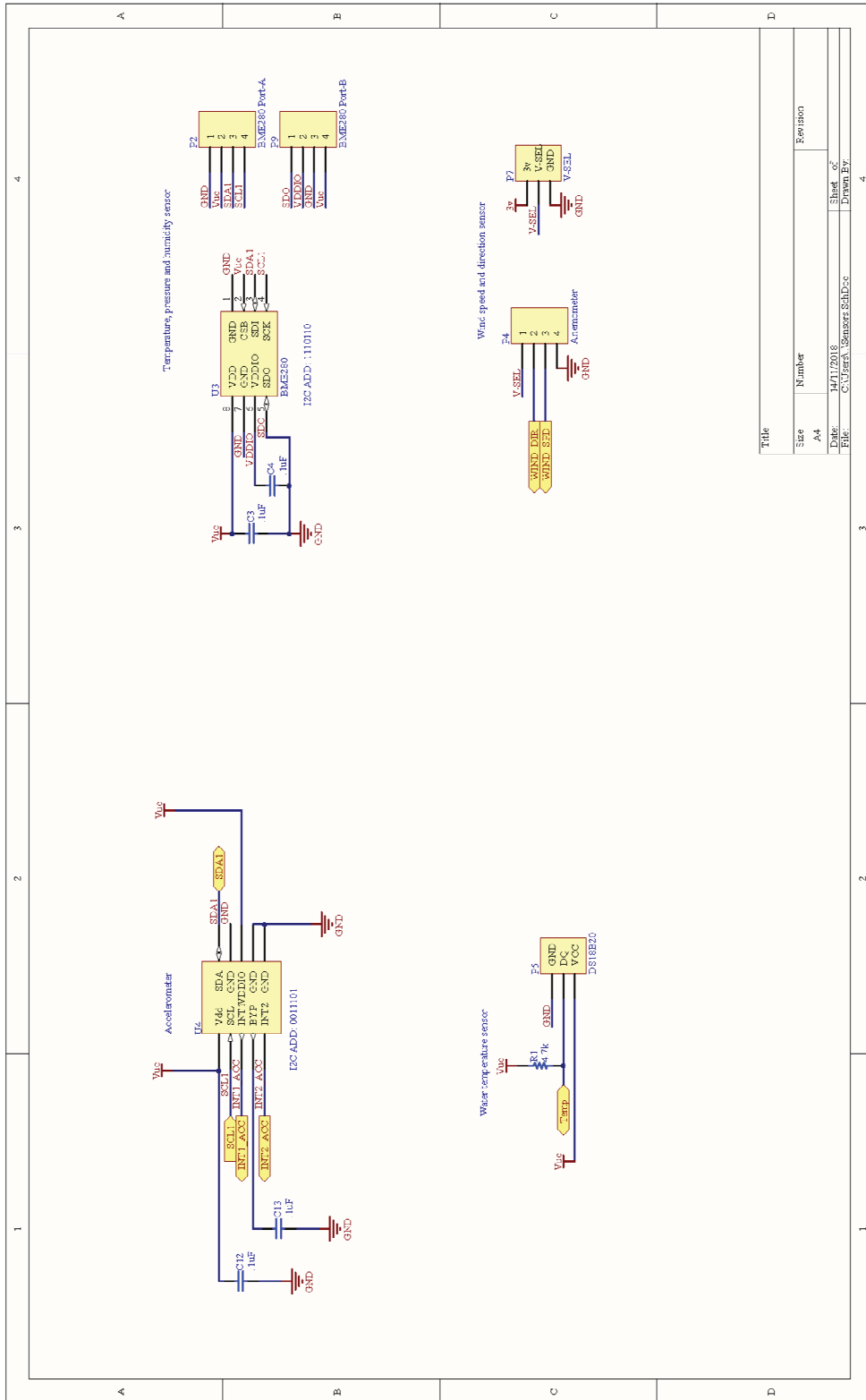


THP	Size	Number	Symbol
1	100	1	100
2	100	1	100
3	100	1	100
4	100	1	100
5	100	1	100
6	100	1	100
7	100	1	100
8	100	1	100

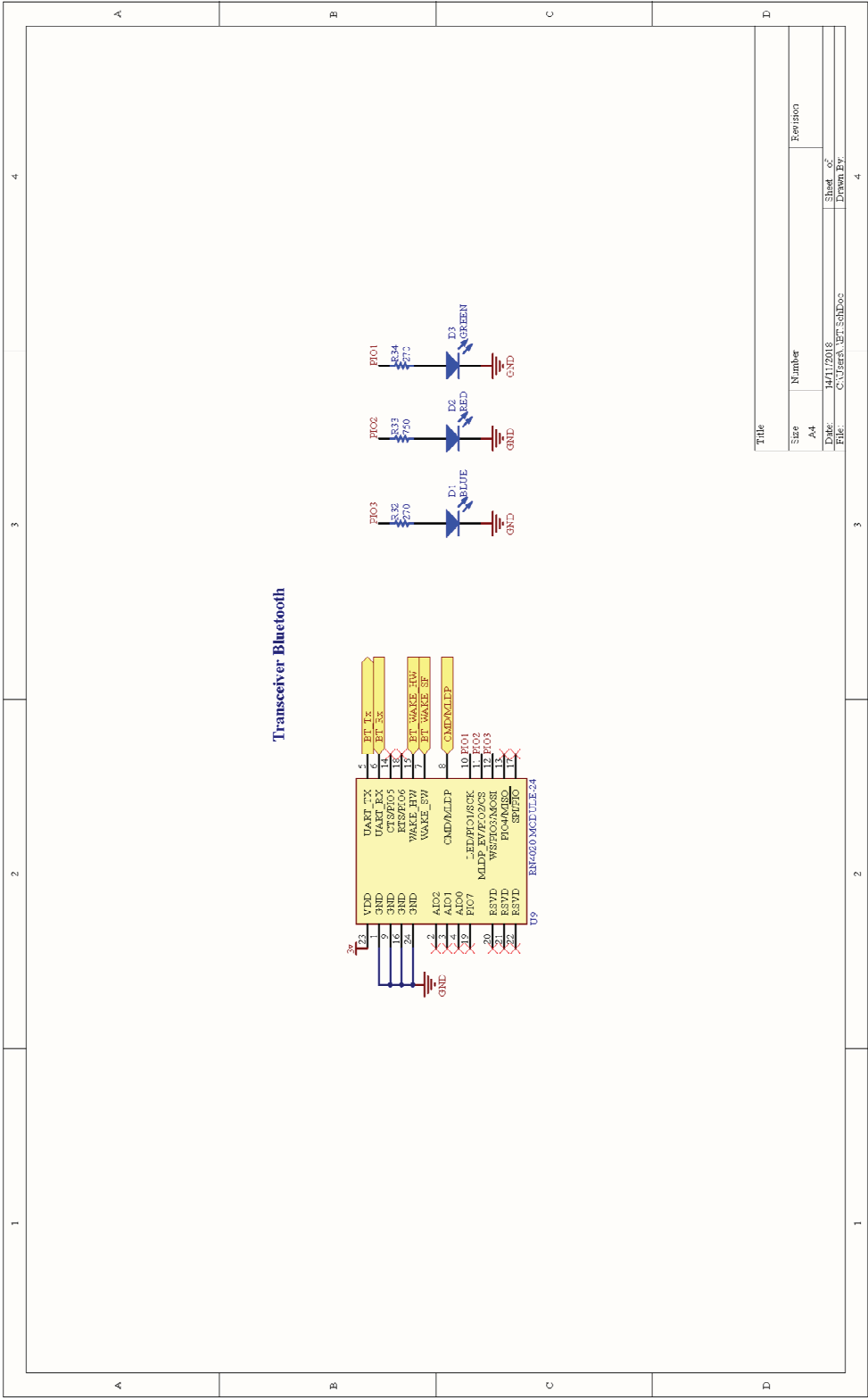




Size	Number	Source
01	1	...
02	1	...
03	1	...
04	1	...
05	1	...
06	1	...
07	1	...
08	1	...



Title		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	14/11/2018	Sheet: 02
File:	C:\Users\... \Documents\... \SCHD2.c	Drawn By:



Anexo III: Publicaciones

WiFi Sensor Networks: A study of energy consumption.

Carlos A. Trasviña-Moreno*, Ángel Asensio, Roberto Casas, Rubén Blasco, Álvaro Marco.

Institute of Engineering Research (I3A)

University of Zaragoza

Zaragoza, Spain

*ctrasvina@humanopenware.com

Abstract— This paper describes an energy consumption analysis of a wireless sensor node with a WiFi transceiver and its feasibility in smart city developments. A description of energy budgeting strategies is detailed, from which a theoretical calculus is made to validate the node setup energy wise. Afterwards, a practical measurement of the consumption is effected with TCP/UDP transmission protocols and various scenarios. A final comparison is made with a common battery module to give an idea of the longevity obtainable.

Index Terms— WiFi, energy consumption, smart city, sensor, WSN, low power.

I. INTRODUCTION

Wireless Sensor Networks (WSN) provide key information that help improve the way of life without the need of human interaction [1, 2]. These deployments demand low power design methodologies and strategies that can effectively manage the amount of energy provided to expand the lifespan of systems as much as possible [3, 4].

Wireless communications are one of the greatest, if not the highest, energy consuming sections a sensor node can present. Due to this it is common, in WSN, the usage of low power protocols like Zigbee, Bluetooth and proprietary protocols, amongst others [5]. These present the most energy efficient solutions commonly known, although they are not usual amongst non-technical users and have little to no existing infrastructure overlaid in metropolitan areas. On the other hand, 802.11 based protocols have a very widespread network with a high market penetration, which enables users to easily receive and transmit information from almost any handheld device or its own computer, yet it is not commonly utilized in sensing applications.

One of the primary reasons why this is thought is due to the idea that WiFi is a very power hungry protocol that can be used for high data streaming exclusively [6]. While this is partially true, it also presents new developments that may be applied to sensing activities. Current protocols advancements, merged with power saving strategies and low power electronics is thought to enable WiFi WSN in smart city environments [7, 8].

The analysis of this hypothesis will be the key focus of this paper and will be discussed in the following sections.

II. SENSOR DEFINITION

A sensor network may have a vast amount of nodes, which will behave in different ways. According to the relationship with its environment, they can be classified in sensors, actuators, interfaces, gateways and routers. Some nodes may present one or more of these capabilities.

A vast amount of the WSN systems are focused mainly on sensing only. This means that the device will extract the required information and transmit to a higher system without interaction with other nodes. Taking this in account, there are some basic operation strategies can be considered:

- On-time measurement and transmission. The rate for measurement and transmission may be the same or several measurements can be clustered and then sent as a whole.
- Threshold analysis. Measurements are done by interruption triggered events or on-time scheduling and transmission only if user defined conditions are met.
- Real-time sensor availability. The node will always “hear” the needs of the system, thus measuring and transmitting when required.

The first two options can satisfy the majority of applications that have the need for sensing capabilities. It is possible to opt for a state of “sleep” for the communication node most of time, as messages will be sent only on predefined conditions. In the last scenario, it is not feasible to satisfy this condition as the wireless sensor may be called at any time for its contribution.

Said this, in most cases, a WSN can be considered as a series of sensor devices that report information to a system. This definition adapts to a scenario of a WiFi system, associated to a central Access Point (AP) in infrastructure mode, in which the communication system is inactive the majority of time [9].

III. WIFI COMMUNICATIONS

The general idea of WiFi is that it is not suitable for stand-alone sensing applications, due to initial WiFi standards which were oriented to high data streaming on PC environments with H2M (Human-Machine interaction) where power consumption was not a factor.

With the arrival of concepts such as “Internet of Things” came new necessities to fulfill [10, 11], where interaction would deviate from the original H2M scenario to a more M2M (Machine-Machine) schema and energy management would play a key role. Seeing as the primary focus of WiFi was not low power operation, new transceivers were developed with sleep and hibernate modes, as well as faster transition timings between active and inactive states [12], which allow WiFi nodes to be able to operate for long periods of time with a strict energy budget. IEEE 802.11 standards, such as 802.11g, can invoke a Power Save (PS) mode where an AP buffers data destined to a node, keeping the wireless station in sleep or idle mode the majority of time until needed. Also new protocols such as 802.11n are introduced, utilizing dual-band (2.4 GHz and 5 GHz) channels with 20 MHz or 40 MHz bandwidth and multiple-in multiple-out (MIMO) capabilities [5]. This allows an array of up to four antennas that enable spatial multiplexing or beam forming, for an increased data rate performance and a wider network range. Although 802.11n may be understood as a super high capacity streaming protocol, it is not exclusive and features like high data rate transfer may be employed on low power systems vastly reducing the transmission time [13].

IV. FINITE STATE MACHINE

With the previously stated, a model that represents the main activities from a more general perspective is sought out. For this, the on-time measurement and transmission (OTMT) strategy will be used to define the systems operating functionality. The standard IEEE 1451.5 [14] defines a wireless interface for sensors, microprocessors or instrumentation systems and specifies the radio protocols for these same interfaces. In this standard a Finite State Machine (FSM) is defined so as to describe the functionalities of a sensor node, from this FSM three basic states are defined. This model is not specific to any communication technology, as can be appreciated in the work of Asensio, Blaco, Marco and Casas [15] where it is used to describe a ZigBee sensor node. The same three state model is used to describe a WiFi node, with the appropriate modifications to suit the OTMT operation strategy (Figure 1).

1. Initialization state: Hardware start-up (oscillator warm up, peripheral and variables initialization, etc.).
2. Active state: Sensing tasks are defined in this section as well as data transmission. While sensing, the node will be required to enable the sensor peripheral AD converter for the data acquisition and disable it once the task is concluded. In the case of message broadcasting, the radio module will need to

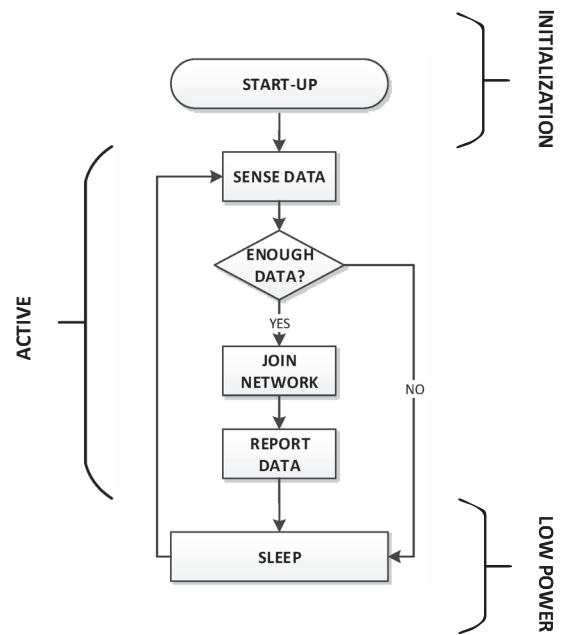


Figure 1- WiFi Finite State Machine node

join the network, report the data and close the connection to avoid energy consumption.

3. Low power state: Radio module will be turned off, microcontroller will be maintained in sleep mode and all peripherals will be disabled or turned to the lowest consumption state.

V. THEORETICAL POWER CONSUMPTION ANALYSIS

As proposed by Asensio, Blasco, Marco and Casas [15], a theoretical analysis is used to quantify the amount of energy consumed in different stages.

Consumption states are defined and divided in sub-states so as to clearly depict each fundamental activity and how it affects the overall performance (Table 1). Also, for each sub-state, equations are formulated to have a generalized methodology for different hardware setups and swiftly calculate the amount of charge used on each step. All the data utilized in these formulas can be extracted and/or calculated from datasheets and application notes. For example the charge for wake-up transitions may be calculated with the mean current of the device, accordingly to the power mode, and the wake-up time (Table 2).

In a normal node life cycle the initialization step will only run once or a few times, considering a worst case scenario where hard resets are applied. With this assumption it is possible to infer that the initialization step can be overlooked, as it represents a negligible portion of the utilized charge. Thus, the total consumed charge per cycle can be simplified as follows:

$$Q_{CYCLE} = Q_{SENSE} + Q_{JOIN} + Q_{REPORT} + Q_{SLEEP} \quad (1)$$

Table 1-Power modes for μC and RM

	Power mode 0 (PM ₀)	Power mode 1 (PM ₁)	Power mode 2 (PM ₂)	Power mode 3 (PM ₃)
μC	Deep sleep (low power RTCC running)	High power (fast oscillator)	Not applicable	Not applicable
RM	Deep sleep or powered off	Not applicable	Rx on	Tx on

Table 2- Charge consumption by sub-state for an operating cycle

STATES	SUB-STATES	CALCULATION
Initialization	Disable peripherals	$I_{\mu C_1} * t_{INIT} + Q_{\mu C_{INIT}}$
	Initialize variables	
	RTCC initialization	
	RTCC alarm startup	
	Change power mode	$Q_{\mu C_{1 \rightarrow 0}}$
Sense data	Change power mode	$Q_{\mu C_{0 \rightarrow 1}}$
	Activate sensor and peripheral port	$I_{\mu C_1} * t_{SENSOR}$
	Acquire data	$(I_{\mu C_1} + I_{SENSOR}) * t_{ACQ}$
Join network	Change power mode	$I_{\mu C_1} * t_{RM_{0 \rightarrow 2}} + Q_{RM_{0 \rightarrow 2}}$
	Transmit connection message	$(I_{\mu C_1} + I_{RM_2}) * t_{CTx}$
	Wait for acknowledgment from the AP	$(I_{\mu C_1} + I_{RM_2}) * t_{CTx}$
Report data	Change power mode	$I_{\mu C_1} * t_{RM_{2 \rightarrow 3}} + Q_{RM_{2 \rightarrow 3}}$
	Transmit data	$(I_{\mu C_1} + I_{RM_3}) * t_{TX}$
	Change power mode	$I_{\mu C_1} * t_{RM_{3 \rightarrow 2}} + Q_{RM_{3 \rightarrow 2}}$
	Receive ACK (optional)	$(I_{\mu C_1} + I_{RM_2}) * t_{ACK}$
	Detach from server and close connection	$(I_{\mu C_1} + I_{RM_2}) * t_{CLOSE}$
Sleep	Change power mode	$Q_{\mu C_{1 \rightarrow 0}} + Q_{RM_{2 \rightarrow 0}}$
	Sleep	$I_{\mu C_0} * t_{SLEEP}$

Where:

$I_{\mu C, RM_{0,1,2,3}}$: Current consumed by μC and RM in power modes 0,1,2 and 3 respectively.

$Q_{\mu C, RM_{0,1,2,3 \rightarrow 3,2,1,0}}$: Charge drained by μC and RM in transitions between corresponding power modes.

$Q_{\mu C_{INIT}}$: Charge drained by μC in initialization.

t_{SENSOR} : Time needed by the sensor to startup operations.

I_{SENSOR} : Current drawn by the sensor while obtaining data.

t_{ACQ} : Time needed by the μC for data acquisition from the sensing entities, e.g. A/D conversion.

t_{CONtx} : Time needed by the RM to transmit a connection message to the central AP.

t_{CONrx} : Time needed by the RM to receive an acknowledgment message from the central AP.

t_{TX} : Time needed to transmit data from the RM the central AP.

t_{ACK} : Time needed to receive the acquisition message between RM and central AP.

t_{CLOSE} : Time needed to close communications between RM and central AP

t_{SLEEP} : Time in sleep mode.

To have a full view of the capabilities of a WiFi sensor node, a comparison between different transmission protocols will be made. For each, there will be an analysis of time and current consumption for different package sizes. In addition, various sensing and data delivery situations will be assessed, so as to view the variations in power expenditure.

VI. DESCRIPTION OF THE AUTONOMOUS SENSOR

For the validation of the previous hypothesis, an analysis of a wireless sensor node will be used. For such a setup, the following components have been selected.

- PIC24FJ256GA106 microcontroller.
- MRF24WB0MA 802.11b WiFi transceiver.
- Real ICE power monitor and Tektronix oscilloscope
- LM35 temperature sensor
- Belkin 802.11n wireless router.

The microcontroller and transceiver were selected due to their low power operation modes and relative fast transition times. The PIC24FJ256GA106 and MRF24WB0MA can operate from a 2.7 V to a 5.0 V power source, which will alter the amount of current drawn, including leakage losses. Although not the best in class, these devices depict a mean for low power electronics and, consequently, provide a non-optimal scenario as a basis for this paper.

Microchip's Real ICE power monitor will be utilized to quantify the amount of current employed and to measure the period of time in which the node is in active state. This module can measure currents from 1mA to 1A with a precision of one sample per microsecond. For greater resolution analysis, the Tektronix oscilloscope will be put to use.

VII. TEST SETUP AND VARIABLE ANALYSIS

A real time comparison between TCP and UDP transmission protocols will be made. For each, there will be a time measurement analysis for different package sizes. From this data a statistical mean will be calculated to represent the effort of the wireless node to deliver data to the network. In addition, an estimation will be made for the node in a 24 hour cycle of operation where various sensing and transmission scenarios will be assessed, so as to view the variations in power expenditure (Table 3). When not sensing or transmitting the node will be considered as in sleep mode.

VIII. RESULTS

With the prior setup and technical data provided by the manufacturers, the current consumed as well as the time in each transition or phase have been quantified (Table 4). This will provide a good estimation for the calculations of different scenarios with various timelines, so as to find the appropriate context where this type of deployment is viable.

The results thrown by the theoretical analysis displayed adequate conditions to proceed with the development of the wireless node. To visualize and capture the actual node

Table 3-Sensing and transmission scenarios

Scenario #	Time between Senses	Time between Transmissions
1	10s	1h
2	60s	1h
3	600s	1h
4	1h	1h
5	600s	600s
6	10s	600s
7	600s	24h
8	60s	4h
9	600s	3h

Table 4 – Current and time consumption from datasheets

	POWER CONSUMPTION	
	uC	RM
I ₀	10 μA	---
I ₁	24 mA	---
I ₂	---	89 mA
I ₃	---	154 mA
I _{SENSOR}	80 μA	---
Q _{μCINIT}	769.16 μC	---
Q _{0→1}	2.13 μC	---
Q _{0→2}	---	13.35 mC
Q _{2→3}	---	1.21 μC

Q _{3→2}	---	1.21 μC
Q _{2→0}	---	8.9 μC
Q _{1→0}	2.13 μC	---
t _{INIT}	64.07 ms	---
t _{0→1}	178 μs	---
t _{0→2}	---	300.2 ms
t _{3→2}	---	10 μs
t _{2→0}	---	200 μs
t _{1→0}	178 μs	---
t _{SENSOR}	225 ns	---
t _{ACQ}	975 ns	---
t _{CON}	---	3.6 s
t _{TX}	---	4 ms
t _{ACK}	---	128 μs
t _{CLOSE}	---	500 ms

consumption of the setup, the Real ICE power monitor is put to use.

The waveform of the consumption in the active state may be visualized to depict the various activities on sensing and transmitting operation, thru the Real ICE interface. To obtain the average current consumption thru-out this phase, a trapezoidal integration is realized and the result is divided amongst the maximum number data points obtained. Furthermore, the different package size transmissions are evaluated for each protocol, giving an idea of real delivery times (Table 5).

As expected, UDP presents a faster transmission time as it does not need an acknowledgment message from the AP, thus making a faster transition to a sleep state. The ACK reception represents a time difference which increases depending on the amount of data transmitted. On the other hand, TCP will guarantee the reception of data to the AP. Seeing as the time difference represents a miniscule portion in the overall transmission state, it may be preferable to have this assurance over a faster message deliverance.

Having selected different scenarios in which the node could operate, the comparison is made between TCP and UDP transmission in an open WiFi network (Table 3).

Afterwards the results are matched to a generic rechargeable Nimh battery array, which provides a 3.6V output with a capacity of 2400mAh, to have an idea of the lifespan of the node with a full charge of the storage unit (Figure 2).

Table 5-Data transmission times

Data Transmission Time (ms)				
Protocol	1byte	10bytes	100bytes	1k
UDP	4.081	4.1	6.079	9.999
TCP	12.24	12.32	14.08	20

Although unexpected, TCP transmissions present a more economical solution than UDP for this specific node setup. This is due to the time it takes our current arrangement to open a UDP socket, which in the end adds 300ms to the active state. Given these results, it would be preferable to use TCP even when data transmissions are longer due to the ACK message wait. For bigger data packages, like when streaming video or audio, UDP compensates for those 300ms of offset and can be a more viable solution. Also, it can be easily depicted that increasing the amount of transmissions drastically affects the overall consumption. It is better to accumulate data from a wide amount of sensing events and send the bulk in a few deliveries. In scenarios where sensing operation is maintained for extended periods of time, the sleep current plays a key role in the total consumption, as can be seen in scenarios 7 thru 9. Additionally the influence of the amount of transmissions affects greatly the longevity.

As expressed in section I, usual implementations of WSN utilize communication protocols such as ZigBee or others. For these type of setups the life expectancy is from several months to years. As seen in Figure 2 similar results can be achieved with the current setup if the amount of transmissions is kept to a minimum and data is sent as a bulk. A key difference between WiFi and ZigBee protocols are the connection times and current consumption, the later of the two with the upper hand in both capabilities. Yet this disadvantage can be balanced with the benefits of the overlaid infrastructure and a proper operational strategy.

IX. CONCLUSIONS

In this paper we evaluated the energy consumption of a low power wireless sensor node within different operating scenarios with the purpose of verifying the feasibility of a WiFi node deployment in a metropolitan environment. Part of this study is based on previously published models that analyzed other communication protocols for WSN.

From the theoretical analysis, based on the proposed strategy, the highest consumption states have been identified. At first glance the states in which the transceiver is enabled seem to play the most significant role in the study, as radio transmissions represent the highest energy cost of a cycle.

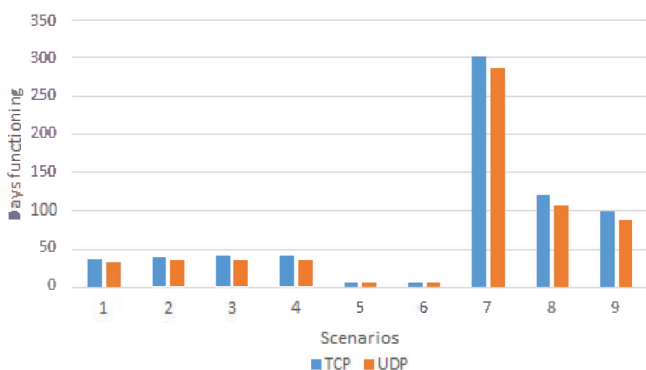


Figure 2 – Lifespan protocol comparison

In reality, it is the sleep state which affects the most, as more than 90% of the time this is the active phase. Using an OTMT strategy, a significant reduction in the overall power demand will come if the sleep current is minimized, even greater than reducing the active state current.

The measurements show that with proper energy budgeting strategies it is possible to enable mid-range low power WiFi node for sensing applications, accentuating the idea that WiFi can no longer be excluded as a possibility for WSN deployments. It is possible to mediate between a fair amount of sensing repetitions and transmissions to the network without having an increased the amount of current consumed. With a descent sized energy storage, it is possible to have the node functioning for a few days without the necessity of recharging the battery. Additionally, with the high data transmission ratio it is possible to send large loads of information without significantly affecting the overall consumption.

Being a well-known and widely used protocol, it simplifies the interaction with non-technical users making it feasible to have a DIY sensor kit for deployment in a wide variety of metropolitan spaces. Additionally, having IP based devices facilitates the interaction with handheld devices, such as smartphones, and enables cloud computing nodes. Although not currently suited for all sensing activities, WiFi technologies can be fitted to scenarios in which a given variable must be monitored for data mining and other similar cases.

With cutting edge low power electronics it is possible to diminish the amount of energy consumed, granting a longer node life with a lesser battery recharge rate that could be comparable to the expectancy of a ZigBee node. Also, by lowering the power demand it could be possible to use ambient sources to energize the node which would reduce the interaction of the user with the device making it more autonomous.

ACKNOWLEDGMENT

Trasviña-Moreno thanks the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for providing a scholarship for a Master's Degree study and to the reviewers, for their comments that helped improve the outcome of this paper.

REFERENCES

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey", *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [2] S. Roundy, D. Steingart, L. Frechette, P. Wright, J. Rabaey, *Wireless Sensor Networks*, vol. 2920, 2004, pp. 1-17.
- [3] "Wi-Fi in sensor applications", whitepaper, RedPine Signals Corp., Apr. 2009
- [4] C. Bachmann, M. Ashouei, V. Pop, M. Vidojkovic, H. D. Groot, B. Gyselinckx, "Low-power wireless sensor nodes for ubiquitous long-term biomedical signal monitoring," *Communications Magazine, IEEE*, vol.50, no.1, pp.20,27, January 2012

- [5] M. Starsinic, "System architecture challenges in the home M2M network," *Applications and Technology Conference (LISAT), 2010 Long Island Systems*, vol., no., pp.1,7, 7-7 May 2010.
- [6] G. R. Hiertz, D. Denteneer, L. Stibor, Y. Zang, X. P. Costa, B. Walke, "the IEEE 802.11 universe", *Communications Magazine*, IEEE, vol. 48, no. 1, pp. 62-70, Jan. 2010.
- [7] J. M. Hernández-Muñoz, J. B. Vercher, L. Muñoz, J. A. Galache, M. Presser, L. A. Hernández-Gómez, J. Patterson, "Smart cities at the forefront of the future internet", in *Future Internet Assembly*, J. Domingue et al., Eds. 2011, pp. 447-462.
- [8] J. P. Berruoco, "Integration of wireless sensor networks in the internet of things by using low power WiFi", Master on Industrial Electronics, Universidad Politécnica de Madrid, 2013
- [9] "Wireless LAN medium access control and physical layer specifications" IEEE 802.11-2007, June 2007.
- [10] S. Tozlu, "Feasibility of Wi-Fi enabled sensor for internet of things", *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 291-296, July 2011.
- [11] A. Merentitis, F. Zeiger, M. Huber, N. Frangiadakis, K. Mathioudakis, K. Sasloglou, G. Mazarakis, V. Gazis, Z. Boufidis, "WSN Trends: Sensor Infrastructure Virtualization as a Driver Towards the Evolution of the Internet of Things", *UBICOMM 2013: The Seventh International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies*, pp. 113-118, September 2013.
- [12] "Low power Wi-Fi (IEEE 802.11) for IP smart objects", whitepaper, GainSpan Corp., 2009.
- [13] D. Halpernin, B. Greenstein, A. Sheth, D. Wetherall "Demystifying 802.11n Power Consumption", *HotPower*, USENIX Association, 2010.
- [14] IEEE Standard 1451.5, IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators – wireless communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats, IEEE, 2007.
- [15] A. Asensio, R. Blasco, A. Marco, R. Casas, "Hardware architecture design for WSN runtime extension", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, pp. 1-11, 2013.

Research Article

Autonomous WiFi Sensor for Heating Systems in the Internet of Things

C. A. Trasviña-Moreno, R. Blasco, R. Casas, and A. Marco

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, 50018 Zaragoza, Spain

Correspondence should be addressed to C. A. Trasviña-Moreno; trasvina@unizar.es

Received 30 September 2015; Revised 10 December 2015; Accepted 16 December 2015

Academic Editor: Vincenzo Paciello

Copyright © 2016 C. A. Trasviña-Moreno et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In smart cities and home applications, the use of Wireless Sensor Networks to extract environmental data becomes more common with the passing of time. These sensors are used for a wide array of applications, but mainly to manage energy consumption in domestic buildings. One of the key energy consumers in households is heating systems. To monitor them, sensors are used with wireless communication protocols, like ZigBee, to transmit data to a central processing unit (CPU). WiFi communications, on the contrary, are rarely seen in these implementations due to its high energy consumption, although almost in every home one can find such networks. Yet, with the Internet of Things (IoT), new revisions of the standard have arisen which enable this technology for wireless sensing. To validate this theory and fill a technological necessity, this proposal is presented. In this work, the design and implementation of an autonomous WiFi sensor, paired with thermoelectric energy harvesting, are presented as an IoT solution for monitoring heating devices. For this, a thorough analysis of the proposed architecture is presented. Tests regarding energy consumption and generation, efficiency, and real world scenario trials are done. Finalizing, a comparison between the obtained results and current implementations is shown.

1. Introduction

In current times, there is a great interest in having control over energy consumption in home environments. This generates a large market demand for devices that monitor such variables indoor. Currently, this is covered by Wireless Sensor Networks (WSN) which can be widely varied in their architecture, using different means for communication, energy management and storage, sensor devices, and so forth. Depending on the variable or device that is to be monitored, these may also vary greatly.

One of the most power demanding systems in these indoor scenarios is the heating systems, which usually are comprised of several heat radiators distributed along the different spaces of a household.

In Spain, there are over one million households that have centralized heating (CH) systems [1]. According to a study made in Italy, where these type of systems are also common, they present a low energy efficiency compared to that of independent units [2]. Due to the nature of CH systems,

the amount of energy used by each dwelling habitat is normally divided equally amongst all tenants. This type of energy management creates uneven situations, as some users may not use the heating system on a regular basis, while others will exceed its usage; yet, all will be charged the same fair. Thus, the cost of usage for these systems is divided without taking in account the individual consumption of each habitat.

These type of CH systems which lack effective control and monitoring mechanisms, as well as behavioural patterns of the less conscious house dwellers [3], generate an environment where there is little interest in energy efficiency and energy-saving measures.

According to the 2012/27/UE directive of the European Parliament and the Energy Efficiency Council, in its 9th article [4], it will be required that all end users of these type of heating systems install an individual energy counter which will reflect its actual energy consumption. Moreover, it will provide the users with real-time, or near real-time, data regarding its usage. This directive states that, in Europe,

all households should have these type of “energy auditors” before the 31st of December of 2016. This applies to all households, with either individual or centralized heating systems.

Due to this, and similar requirements, in home automation and smart buildings, it is common to find smart devices in constant communication. According to their communication range, they can be classified in short- and mid-range communication devices. In short-range communications, it is common to find protocols such as Bluetooth, ultrawide band, and infrared data association, whilst in mid-range communications, the most common are 802.15.4 based protocols [5], such as ZigBee, and 802.11 protocols [6], like WiFi [7]. It is common to find applications and proposals for sensor devices that utilize ZigBee communications, as it is one of the most energy efficient protocols available [8, 9]. Yet, this protocol has a major drawback that it requires a dedicated network deployment which is uncommon in home environments. On the other hand, WiFi is probably one of the most well-known and sought out protocols in the market [10–12]. Its network deployments can be found almost in every household and even in other types of urban scenarios. However, the original design of WiFi was not thought of for low power devices or low data rates. In current times, with the coming of Internet of Things (IoT), this protocol has gone thru new revisions which allow low power modes and other benefits, making it more suitable for low power smart devices.

With the recent changes that WiFi presents, it has opened doors to new possibilities for powering smart low power WiFi devices. One of the most interesting ones is energy harvesting. This type of technology takes advantage of ambient sources, such as light emissions, thermal variations, and radio frequency, and converts them into electrical energy [13, 14]. These type of environmental sources can also be found and put to good use, in urban buildings and households [15]. Depending on the selected energy source to harvest, different techniques, as well as electronic devices, must be used to extract the most amount of energy possible in an efficient manner. The use of energy harvesting in smart sensors and devices enables the possibility of discarding standard batteries, which present a limited life span. By consequence, the use of batteries limits the use of the smart devices and forces the user to constantly replace these if he wishes to continue utilizing the device. With the use of energy harvesting techniques, as well as low power electronics, it is possible to increase the life expectancy of a smart device to an almost unlimited amount.

In this paper, an analysis of viability, design, and real world test of a WiFi sensor with energy harvesting for home radiators was realized. Compared to other implementations, the key differentiator in this work is the use of WiFi communications. Utilizing WiFi, compared to other protocols, simplifies the implementation of WSN as the infrastructure is already laid in the majority of households and buildings. Also, it provides a direct link to the cloud, while other technologies would require a bridge device with Ethernet or WiFi communications. This will provide an easy solution to adapt CH and outdated systems, to the newly established directive at a reasonable cost. Additionally, this device may be used to capture other environmental data, using the same

architecture, which could provide a more global and controlled perspective of its surroundings. To accomplish this, first, a comprehensive study of implementations related to sensor devices for heating systems in households was done, and the most relevant are described in the following section. Afterwards, the architecture of this proposal is explained in detail, subdividing it in its key sections. Then, tests and their results, as well as a discussion of the outcome, are shown. To finalize, possible future work lines and the conclusions, according to the stated objectives, are presented.

2. Related Work

In smart home environments, several studies have been made on WSN, some focusing more on the communication protocol and others on energy autonomy.

Wang et al. [16] present a similar approach for energy management to the one proposed in this paper. For their proposal, they had a custom built thermoelectric generator, as well as a three-stage energy harvesting conversion module to provide energy to their sensor device, or mote. With it, they have proved to achieve a global energy efficiency of 25.2%. This specific mote presented ZigBee wireless communications.

Han et al. [17] propose a home energy monitoring system which utilizes ZigBee as communications protocol to transmit consumption data to a central server for analysis. This data, in conjunction with others provided by PLC communications, is used to provide information to the user and allow for a personal management of the energy from a UI.

Kelly et al. [18] describe a home energy monitoring system focused on IoT technologies. By utilizing ZigBee to communicate amongst the sensor nodes and an IPV6 gateway that translates to UDP packets and sends the information to the internet, they monitor parameters such as temperature, humidity, and light, to assess the home energy consumption.

Nguyen and Le-trung [19] propose a low power battery charged WiFi solution for motes in smart building. Their main focus is on optimizing the hardware and software architecture of the mote, achieving a lifetime of 46 days with four 3.7 V 4200 mAh batteries.

These are just some examples of current applications, but as seen in the previously mentioned work, the majority of implementations utilize ZigBee communications. The ZigBee protocol is presented as one of the most widely used in WSN due to its low power characteristics. To integrate sensors with cloud computing and IoT, other authors have opted for ZigBee hybrid network connected to a WiFi or Ethernet gateway [20], similar to the work presented by Kelly et al. [18]. Few proposals utilize solely WiFi communications in smart home environments, and the majority of them power these devices with standard batteries or connected to the main power grid. These reasons are presented as the principal motivation of this work, as well as the study of other viable alternatives which simplify the interaction of users with IoT in home environments.

In the following section, the hardware and firmware design of this proposal will be analysed. This will allow

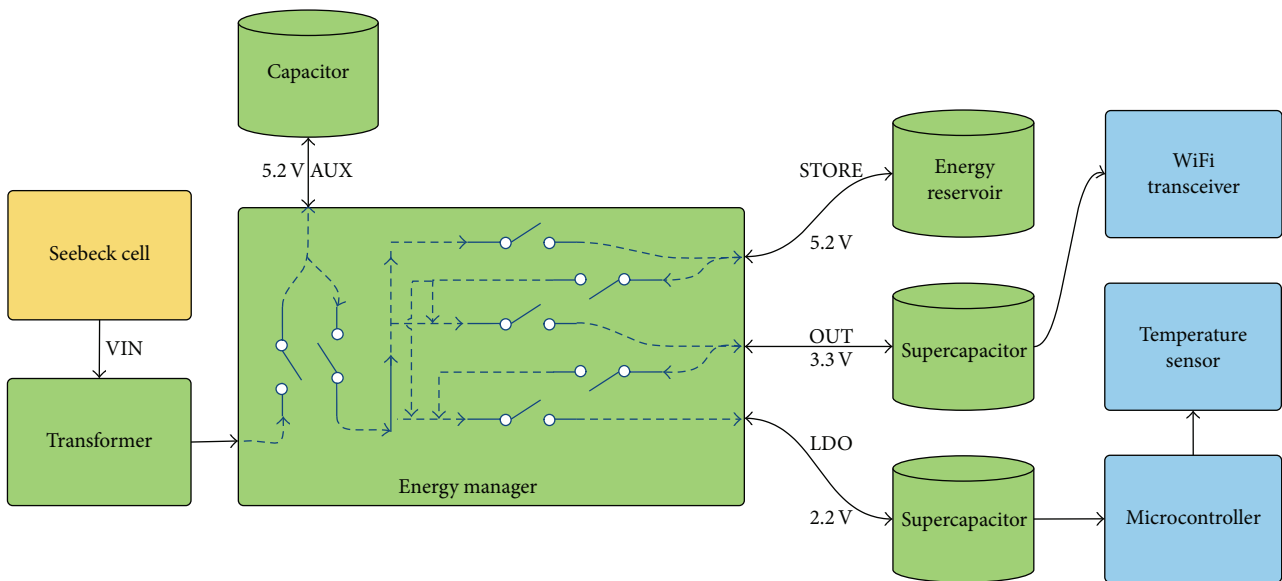


FIGURE 1: Block diagram of the mote, its energy distribution, and the internal energy flow for the energy manager IC.

the reader to better understand some of the requirements needed if a similar work were to be realized.

3. Proposed Architecture

As previously mentioned, the proposed architecture will differ from current implementations by utilizing solely WiFi communications protocol, and by being complimented by a thermal energy harvester as its power source (Figure 1).

In Figure 1, it is possible to view an abstract representation of the functionality and energy distribution of the energy management IC. This device is represented as an “energy multiplexor,” providing energy to its different outputs as needed. Further details on its functionality will be described in Section 3.4.

In this section, the following subjects will be addressed, so as to clearly depict the different areas that were involved in the architecture design:

- (i) Selected hardware and improvements.
- (ii) Low power firmware implementation.
- (iii) Ambient energy transducer.
- (iv) Ambient energy conversion and management.

3.1. Hardware. In order to promote the use of open source hardware, the proposed sensor node was based on an open architecture, namely, the Flyport WiFi module [21]. This unit is comprised mainly of a PIC24FJ256GA106 microcontroller (MCU) [22] and a MRF24WB0MA WiFi module [23], which serve as a central processing unit and wireless communications, respectively. These present low power characteristics and modes which, although not cutting edge, will serve as a baseline for future work.

To improve the characteristics of the Flyport, the original hardware design was modified to reduce the overall consumption of the board. Unnecessary elements such as LEDs, external LDO, and diodes were removed. The main power line was split in two, one for the MCU at 2.2 V and another for the transceiver at 3.3 V. Lastly, a voltage level translator was added for the SPI communications between the MCU and transceiver.

Given that at low voltage levels both the MCU and transceiver start to increase their current consumption, which impacts directly the start-up of the load, switch type circuits were also implemented for both these devices. For the MCU, a SET/RESET circuit was added, which is enabled by a pin from the energy management IC, called PGD, and may be disabled by the MCU. The PGD pin is a digital output that is set to high (2 V) when the OUT output reaches 92.5% of its nominal value. The transceiver, on the other hand, has a MOSFET switch circuit which is enabled by a MCU signal on-demand.

3.2. Firmware. Firmware modifications were done keeping in mind low power strategies as the main orientation (Figure 2). For the initial start-up of the MCU, the 31 kHz internal RC oscillator (LPRC) was used, which reduces the boot-up consumption. Also, all unused peripherals, such as timers, UARTS, and secondary SPI modules, were disabled. The ADC peripheral is enabled only when the sensor needs to be activated; afterwards, it is disabled and its voltage reference is set to GND. Also, the temperature sensor is activated by a digital I/O of the MCU, which is also enabled and disabled with the ADC. Once it is time to transmit, in its first iteration, the oscillator is switched to the high speed 32 MHz clock source and the RTOS, which mostly manages the WiFi activities, is initialized. Finally, both the MCU and transceiver, after finishing their corresponding activities, are set to the lowest

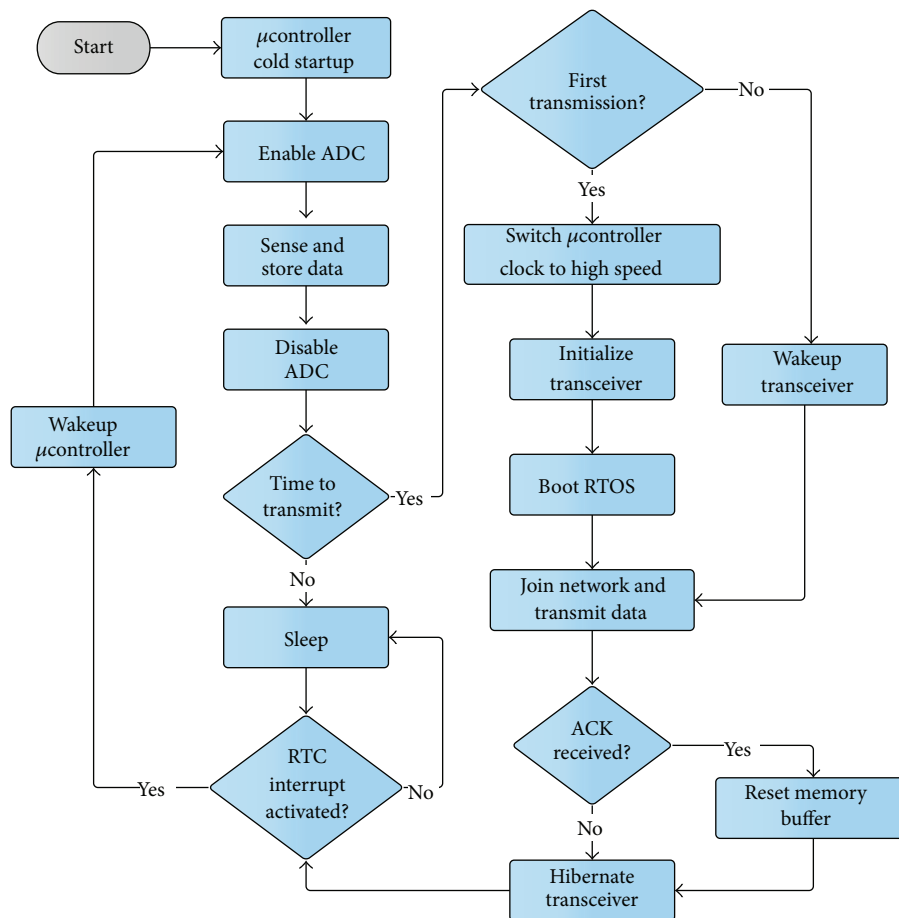


FIGURE 2: Workflow diagram of the WiFi sensor.

power mode available and are awoken by either the Real-Time Clock and Calendar (RTCC) alarm or internal flags.

3.3. Energy Source. The energy harvester (EH) module is comprised of a Peltier cell of $40 \times 40 \times 3.4$ mm with an attached finned heat sink of $40 \times 40 \times 18$ mm with no additional cooling mechanisms.

Although it is possible to increase the output of the Peltier cell with extra cooling, the desire of this study was to analyse the device in a nonoptimum and realistic environment, which would further validate more favourable scenarios (Figure 3).

3.4. Energy Management. To convert the captured ambient energy into more useful magnitudes, the LTC3108 [24] was selected as the core component. This IC will act as a step-up voltage converter and energy management system for the load and energy storage (Figure 1). This device has a static 2.2 V output (LDO), a configurable output (OUT) which was set at 3.3 V, and an additional output (STORE) to connect energy storage such as lithium batteries and supercapacitors. Internally, the LTC3108 distributes the energy similarly as a multiplexor would. An auxiliary capacitor acts as the main distributing line, which feeds the LDO, OUT, and STORE outputs, in that specific order. Once one of the outputs has

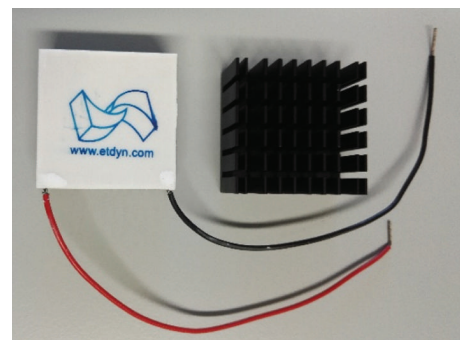


FIGURE 3: Seebeck cell with the finned heat sink.

reached its nominal voltage level, it continues to charge the next one (Figure 4).

When the circuit is loaded, the behaviour of the IC is less linear. If at any point the LDO output starts to demand more energy than the accumulated in the capacitor, it will draw energy from any available source (STORE, OUT, or AUX). Also, if the OUT output requires additional energy, it may draw only from the STORE or AUX sources. The main difference between these two is that the LDO output

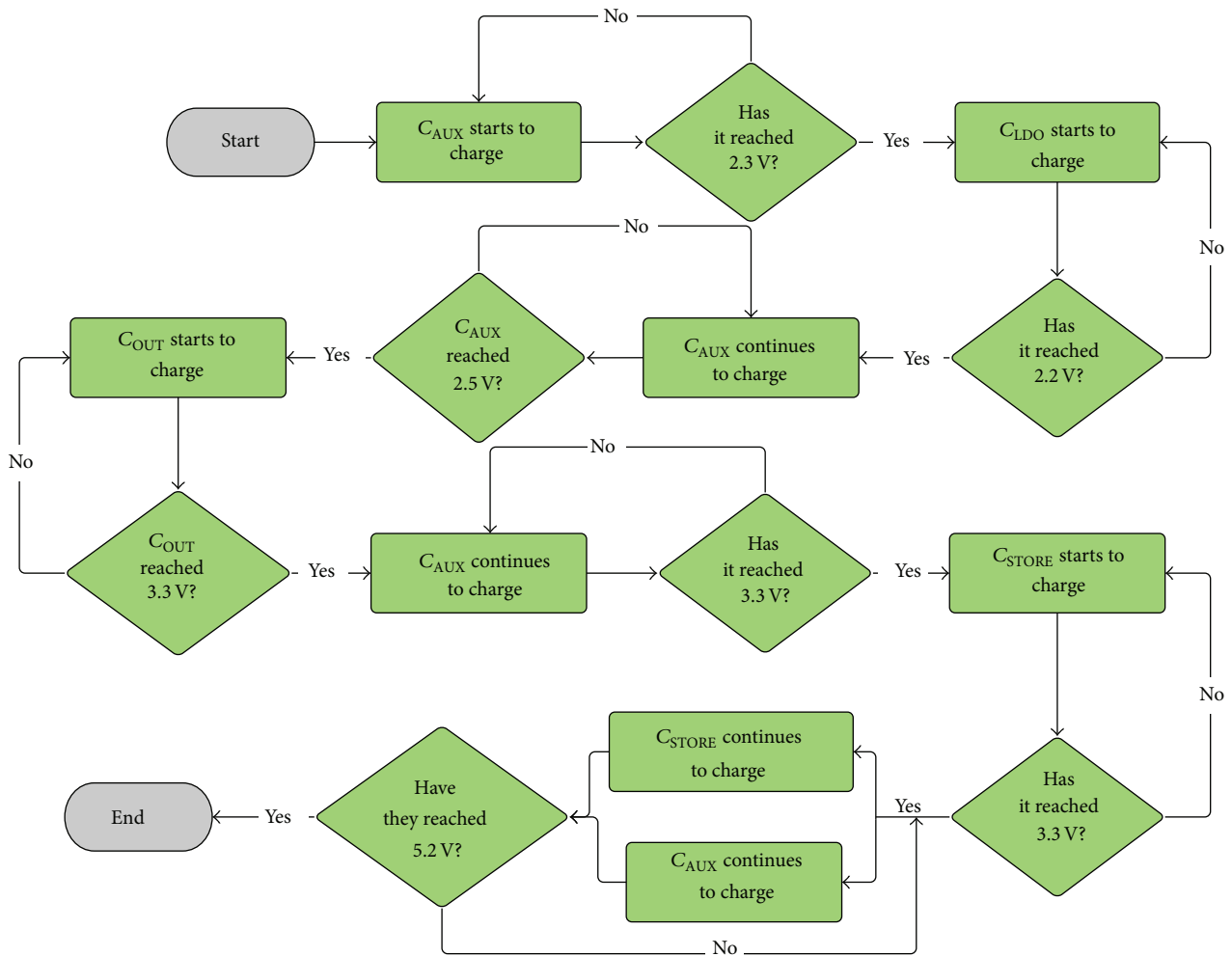


FIGURE 4: Energy manager charge workflow without load.

presents a higher priority than that of OUT and that the LDO will never lend energy to another output. It is important to note that the STORE output will only function in the case that there is additional energy. If all the energy generated is consumed by the load on LDO and OUT, then the STORE output may not be used.

Having described the architecture of this proposal, in the following section, the description of the theoretical and practical methods used to analyse the mote is given.

4. Tests and Results

In this section, a series of analyses and calculations are done for each block mentioned in the architecture. The main objectives are to

- (i) understand the required energy for the load for a given time period,
- (ii) understand the behaviour and capabilities of the thermoelectric generator (TEG),

(iii) validate the functionality and efficiency of the EH block,

(iv) confirm the functionality of the three blocks as a whole in a real world test environment.

To have a clear understanding of each block and the specific tests on each, this section is subdivided into (a) measuring equipment, (b) load energy characterization, (c) thermoelectric generator, (d) energy harvester, (e) mote validation, and (f) mote sustainability.

4.1. Measuring Equipment. To accomplish the previously mentioned goals, a series of tests and calculations were required. To acquire the needed data, such as voltage, current, and temperature, different laboratory equipment was used to measure the data with the highest precision available, including

- (i) Tektronix MSO 2014 oscilloscope [25],
- (ii) Tektronix DMM4050 digital multimeter [26],

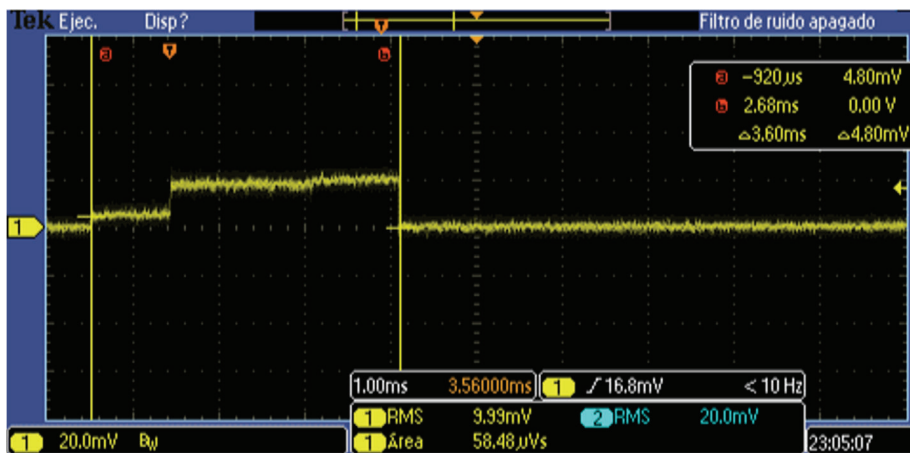


FIGURE 5: Charge consumed by the MCU while measuring temperature. Vertical scale at 20 mV/div and horizontal scale at 1 ms/div.

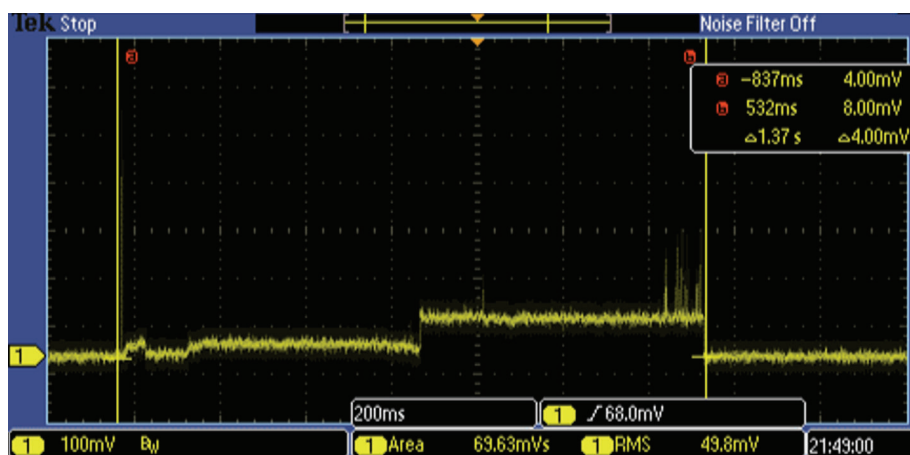


FIGURE 6: Charge consumed by the transceiver while transmitting data. The signal level was lowered below zero to avoid losing charge spikes and alter the measured value. Vertical scale at 100 mV/div and horizontal scale at 200 ms/div.

- (iii) Pico Technology TC-08 thermocouple data logger [27],
- (iv) Type-K thermocouples,
- (v) National Instruments LabView [28].

4.2. Load Energy Characterization. The load is comprised mainly of a MCU, a WiFi transceiver, and a temperature sensor. In prior studies [29], a theoretical analysis of these devices was made with the purpose of understanding their consumption levels. From this analysis, the MCU and transceiver were identified as the primary consumers of the load, and the energy consumption of the sensor can be considered, in most cases, as negligible. To understand the actual energy needs of these two devices, measurements were required to be done of their active and inactive states individually. For this task, the previously mentioned measuring equipment was connected to a PC thru a serial port, using a LabView-based interface, to capture all the data for posterior analysis. It is important to note that all the transmissions were made using the TCP

internet protocol, mainly for security and data continuity reasons.

To measure the active stages, the area under the curve was extracted with the oscilloscope and a $1\ \Omega$ shunt resistor placed on the high-side of each device (Figures 5 and 6).

For the active transmitting state of the microcontroller, the charge consumed by the device is not displayed given that it has a linear consumption with the same period of time as Figure 6. For each active state, several measurements were made from which the average charge was extracted. Given that a $1\ \Omega$ resistor was used to extract these values and the area under the curve is given in voltage per second, a direct extraction of the charge value can be done. For the inactive power stages, the current was measured with the digital multimeter and the average value was also calculated. Lastly, all the extracted data was converted to energy, providing a single comparable unit of measure amongst the devices (Table 1).

In Table 1, three key states and their consumption are displayed. To perform a sensor measurement, the only required device is the MCU; thus, the transceiver is not accounted for

TABLE 1: Average energy consumption of the main devices of the load in their active and inactive states.

State	MCU	Transceiver
Sensing	146.3 μ J	N/A
Transmitting	69.93 mJ	240.2 mJ
Inactive	24.2 μ J	1.65 μ J

in this activity. While transmitting data, both of the devices are required and are at their highest energy consumption levels. Lastly, during the inactive state, both devices display their lowest energy consumption.

To determine the energy consumption of the proposed sensor load, a similar approach is used as the one utilized in the theoretical analysis of a previous study [29]:

$$E_{\text{CYCLE}} = E_{\text{MC}_{\text{SENSE}}} + E_{\text{MC}_{\text{TX}}} + E_{\text{MC}_{\text{INACTIVE}}} + E_{\text{RM}_{\text{TX}}} + E_{\text{RM}_{\text{INACTIVE}}}. \quad (1)$$

Formula (1) shows the total energy per cycle calculations for the load. This formula does not include the start-up energy of the MCU or transceiver, as they are not repetitive on each cycle.

In this formula, E_{CYCLE} represents the total energy of the cycle, in joule, $E_{\text{MC}_{\text{SENSE}}}$ is the MCUs energy consumed while sensing, $E_{\text{MC}_{\text{TX}}}$ is the MCUs energy consumption in transmissions, $E_{\text{MC}_{\text{INACTIVE}}}$ is the MCUs consumption while in low power, $E_{\text{RM}_{\text{TX}}}$ is the transceivers consumed energy while transmitting, and $E_{\text{RM}_{\text{INACTIVE}}}$ is the transceivers consumption while in low power mode.

To be able to calculate the energy of the cycle, an operating scenario must be selected. From a prior study [29], the most viable scenarios were chosen as starting point, where a transmission is done every hour and the amount of sensor measurements is varied. With the selected operation cycles, the predefined energy cycle formula, and the extracted measurements from the load, it was possible to extract the energy per cycle of each state for MCU and transceiver (Table 2).

As seen in Table 2, the energy drawn from the load is high compared to other implementations. The MCU itself is not from a low power device family, and it represents a large part of the consumed energy. One of the main drawbacks is its high sleep current, as in this state the device will be more than 90% of the time and it is noticeably higher than that of the transceiver. The WiFi transceiver presents a high active current consumption compared to other protocols but its total charge consumption is minimized by its low active periodicity as specified by the mote cycle.

Given these estimations, it is possible to understand the amount of energy that will be required from the energy harvesting stage for such an implementation. Thus, the next sections will describe the behaviour and energy expectations of the TEG, or Seebeck cell, and the energy harvesting module.

4.3. Thermoelectric Generator. To obtain energy from the heating device, a Seebeck cell was utilized as a transducer. Understanding the behaviour of the Seebeck cell is critical for

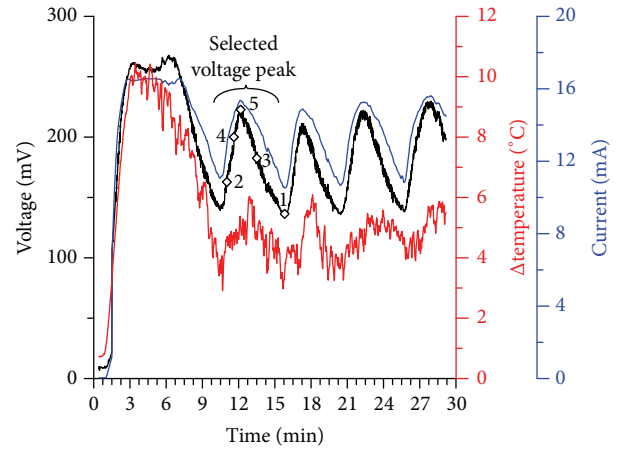


FIGURE 7: Seebeck cell performance test with voltage, current, and temperature difference measurements. Selected test points are depicted and numbered according to their increasing voltage value.

the EH block, as it will help determine the best configuration for a maximum amount of energy extraction. For this purpose, measurements of voltage, current, and temperature difference, throughout a period of time, were made (Figure 7).

As can be seen in Figure 7, at the initial start-up, there is an increased energy generation due to the initialization of the heat radiator. Although useful for a faster start-up of the energy harvesting module, this peak cannot be considered for the estimation of the average conversion, as it represents a phase which will not occur frequently (e.g., each time the radiator is turned on). For the following measurements, the second peak in the graph was selected, as it represents a stable phase of energy conversion. From this peak, five voltage points were chosen, ranging from the lowest to the highest value, with their corresponding current value so as to calculate the power levels at each test point (Table 3).

Even though with the data shown in Figure 8 it is possible to extract the full range of power produced in the test peak, just a selection of these was thought to be a better representation, as they depict the clear operating variation of the Seebeck cell.

4.4. Energy Harvester. Once the TEG starts to generate energy, it is then transferred to the energy management IC for its conversion and management. For its proper functioning, this device requires an external transformer for the step-up conversion. The selection of the transformer is crucial to this IC as it will greatly affect the total efficiency of the energy harvesting, as mentioned by Wang et al. [16].

With the selected test points of Table 3 and the information provided in the datasheet of the energy management IC, at first glance, the 1 : 50 turn ratio transformer seems to be the best selection, as it maintains a more stable efficiency in the obtained voltage range. Yet, at these voltage levels, the current availability is low compared to the maximum tolerated, displayed in the datasheet. Additionally, the efficiency curves are drawn for output voltages of 4.5 V, instead of the 3.3 V configuration used in this proposal.

TABLE 2: Energy consumed by the load in each state.

Measurements (per cycle)	Transmissions (per cycle)	One-hour cycle			
		MCU		Transmitter	
		Active energy (mJ)	Inactive energy (mJ)	Active energy (mJ)	Inactive energy (mJ)
360	1	122.5	87.1	240.2	5.9
60	1	78.6	87.1	240.2	5.9
6	1	70.7	87.1	240.2	5.9
1	1	70	87.1	240.2	5.9

TABLE 3: Test points of energy conversion from the selected voltage peak in Figure 8.

Test point	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)
1	137.24	10.67	1.46
2	160.55	12.85	2.06
3	185.94	14.03	2.60
4	207.02	14.78	3.06
5	224.10	15.35	3.44

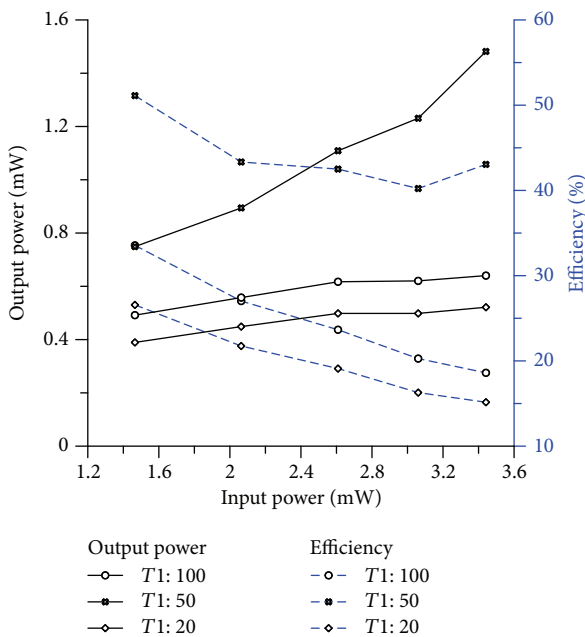


FIGURE 8: Transformer efficiency comparison of OUT at 3.3 V and the VIN input. The obtained power is shown with continuous lines and the efficiency with dashed lines.

To verify which turn ratio transformer was more favourable for the proposed scenario, a practical comparison between these was done by applying voltage and current from a configurable power source, emulating the TEG, for each test point described in Table 3. Voltage and current measurements were made at the main OUT, which led to the calculation of the power at these points, and afterwards the efficiency was extracted (Figure 8).

As seen in Figure 8, indeed, the 1:50 turn ratio presents itself as the best option for the current implementation.

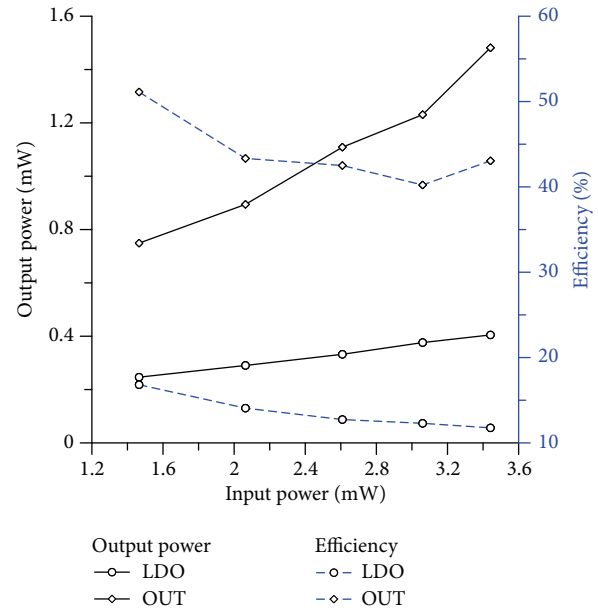


FIGURE 9: Power and efficiency comparison in charge regime. The obtained power is shown with continuous lines and the efficiency with dashed lines.

The main disadvantage of the utilization of this transformer is that, at the start-up, the initial voltage required by the harvester is higher than the 1:100 turn ratio. Although it is important to try to exploit every bit and scrap of energy, analysing the behaviour of the heat source, it is clear that the average amount of energy generated by the Seebeck cell will play a more key role in the long run.

Having selected the appropriate transformer for the energy harvesting module, with the same test points selected previously (Table 3), an analysis of power and efficiency for the LDO and OUT outputs is done. This data will help understand the limitations of the EH block, under the proposed scenario. It is important to understand that the energy management IC has two different work regimes, one for the initial charge of the LDO/OUT outputs and another for the case when the LDO/OUT outputs have reached their nominal values. From here on, these will be referred to as charge and stable regime accordingly. For both these analyses, it is assumed that there is no energy storage, as it will better depict a worst case scenario where energy is not sparing.

In Figure 9, it is possible to view the comparison of the LDO and OUT outputs in reference to the input provided by

TABLE 4: Energy harvesting block comparison with other relevant studies.

	Desai et al. [30]	Lhermet et al. [31]	Wang et al. [16]	This work
V_{IN}	100 mV	1 V	250 mV	185 mV
E_{OUT}	470 μ J	480 μ J	1.02 mJ	1.1 mJ
Efficiency	68%	35%	25%	42%
V_{OUT}	1.8–5.5 V	3.3 V	3.3 V	3.3 V

the EH, in the charge regime. At the initial charge, the LDO output presents a low efficiency. This is mainly because of the low voltage state (2.3 V) that the AUX capacitor has at that time, and the internal efficiency of the LDO embedded in the IC. But, in contrast, the OUT output presents a higher efficiency compared to LDO, ranging from 40% to 51%. To understand the relevance of this information, a comparison was made with other studies (Table 4).

In comparison with other proposals, the current EH configuration provides a higher energy output than the rest. In efficiency, Desai et al. [30] proposal has the highest value but is closely followed by this work.

With this information, it is possible to estimate the time that the energy harvester will take to charge the energy reservoirs of the load, at least in the initial phase when these do not present any charge. To minimize the amount of time the reservoirs take to charge, it is important that the load remains inactive until the stable regime has been achieved.

Having stated that the behaviour of the LTC3108 varies according to the different work regimes, the analysis of the stable regime was done and presented in Figure 10.

In Figure 10, it is possible to see that there are two charge scenarios for the LDO output in this regime. The first scenario is when the output capacitor of OUT is fully charged to its nominal value (3.3 V), and the AUX capacitor has a lower or the same value. In this case, the LDO is charged at the same rate as the OUT capacitor would be charged, thus presenting a higher efficiency. The second scenario is when the AUX capacitor is charged at a higher voltage than the OUT output capacitor, up to 5.2 V. In this case, the efficiency is lower than in the first scenario due to the internal composition of the IC, which limits the amount of current drained to the LDO capacitor [24]. In both regimes, the OUT efficiency remains the same.

In average, the amount of energy that can be extracted in the stable regime from the LDO output is 519 μ J, in its worst charge scenario ($V_{AUX} > V_{OUT}$), and from the OUT output 1.1 mJ. Knowing this, it is possible to state that more than enough energy is generated to maintain both the MCU and transceiver in their inactive states and sparingly charge the energy reservoirs for the active states, according to Table 1.

As mentioned before, these analyses were done without the use of a storage device, which would help increase the charge rate of the output capacitors. Nonetheless, this scenario was also tested, and with a charged supercapacitor of 470 mF it was able to provide an average of 5 mA of current, charging the output capacitors at a very high rate.

Knowing the amount of energy required by the load (Table 2), and realizing that the energy provided by the EH block will not suffice to supply the load in active state by

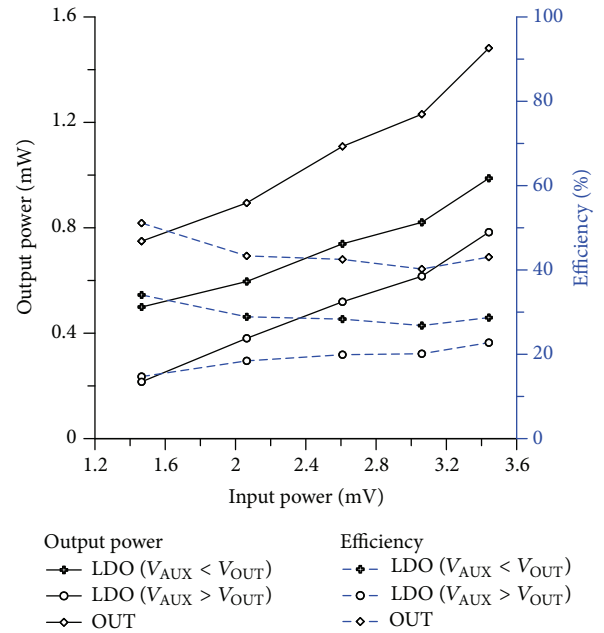


FIGURE 10: Power and efficiency comparison in stable regime. The obtained power is shown with continuous lines and the efficiency with dashed lines.

its own, the next step was to estimate the size of the energy reservoirs that would supply the active pulse consumption. For the energy reservoirs, supercapacitors were selected due to their high density and excellent performance under pulse load conditions. To calculate the minimum capacity required, the following formula was employed:

$$C = \frac{2\varepsilon}{V_2^2 - V_1^2}. \quad (2)$$

Formula (2) shows the capacity of the energy reservoirs for the LDO and OUT outputs, where C is the capacitance in farad, ε is the energy in joule, V_1 is the lowest voltage supported, and V_2 is the nominal voltage. Depending on whether the calculations are done for the MCU or the transceiver, the voltages will vary according to their individual supply and limitations (Table 5).

Having calculated the size of the supercapacitors, it is also important to consider the peak current that will be demanded by the load, as this will define the minimum ESR of the supercapacitors. According to their corresponding datasheets, the MCU consumes a maximum of 24 mA and the transceiver at least 154 mA while transmitting. With this

TABLE 5: Supercapacitor calculations for the load, according to the active energy consumption per scenario.

Measurements (per cycle)	Transmissions (per cycle)	One-hour cycle			
		MCU		Transmitter	
		Active energy (mJ)	Capacitance (mF)	Active energy (mJ)	Capacitance (mF)
360	1	122.6	291.9	240.2	133.4
60	1	78.72	187.4	240.2	133.4
6	1	70.82	168.6	240.2	133.4
1	1	70.08	166.9	240.2	133.4

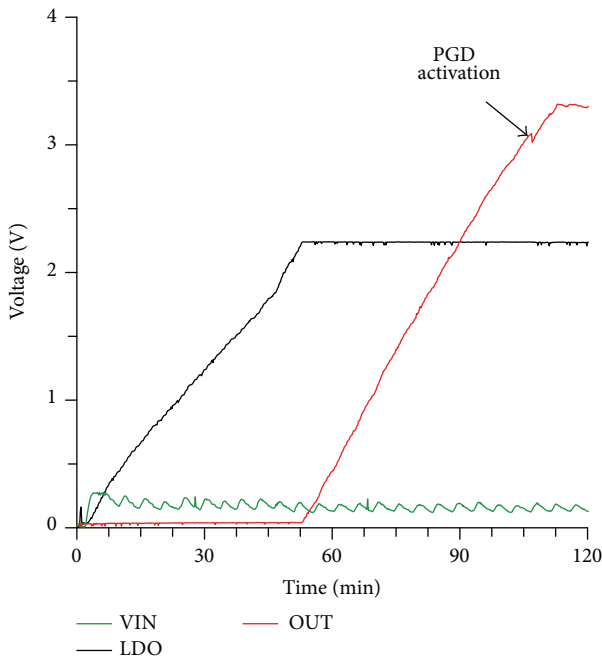


FIGURE 11: Charge time for the output supercapacitor versus harvested energy, at start-up.

in mind, and using the transceivers current as reference, the supercapacitors will require having an ESR lower than 20Ω .

Afterwards, a time-based analysis was done in conjunction with the energy harvesting module. This will allow for a validation of the start-up time required by the mote. For this test, one of the previously mentioned operation cycles has to be selected; thus, the scenario with 60 sense measurements per hour was chosen, as it represents a middle point between all the cycles. As the values of capacitance in Table 5 are nonstandard, 2×100 mF supercapacitors were chosen for the MCU and transceiver each. Next, the TEG was connected to the EH module, the supercapacitors were placed on each output, and voltage on each output, as well as at the EH input, was measured every 10 seconds (Figure 11).

As seen in Figure 11, the initial start-up takes approximately 100 minutes to charge up to the point that the PGD signal is activated, thus connecting the load to its supply voltage and initializing its work cycle. This scenario may seem unfavourable for the sensor, due to the loss of data for the first 100 minutes, but the reality is that this charge behaviour would only happen on its first usage or after it has not been

utilized for a long period of time and the supercapacitors have been fully discharged. Also, this initial charge time may vary depending on the amount of energy generated by the EH block at the time; thus, having more energy will decrease the charge time of the supercapacitors.

With the previous data, it is clear that increasing the amount of sensor measurements may impact greatly the initial start-up, as it would require bigger supercapacitors. Thus, the previously selected operation cycle of 60 measurements and 1 transmission will be used as a basis for the next tests.

Having validated each block of the mote individually, in the next section, the verification of all working parts as a whole will be described.

4.5. Mote Validation. With the data extracted from the previous analyses, the next step was to validate the mote (Figure 12) as a whole by testing it in an actual home environment for a 24-hour time span.

There are two main scenarios that must be distinguished in this test, an 8-hour active period and a 16-hour inactive period. The active period represents the 2PM to 10PM time span, and the inactive period characterizes the span where the heat radiator is shut down. Analysing the inactive period will allow for an understanding of the supercapacitor discharge and the amount of energy required for a system reboot at the following day of operation. The 2–10PM time span was chosen because it is a usual operating cycle of a CH system.

For this test, a 470 mF supercapacitor was used for the STORE output, as well as the 2×100 mF for the LDO and OUT outputs each. Voltage measurements were done at the EH input, STORE, LDO, and OUT outputs every 10 seconds. To verify the successful data transmission to the WiFi server, the Wireshark [32] software was utilized (Figure 13).

The first thing to notice in Figure 13 is the OUT and LDO output transmission energy consumption spikes, which decrease with each transmission. This behaviour is due to the energy that is being accumulated in the STORE supercapacitor, which allows for a faster recharge between transmissions.

Due to the initial start-up time, only 6 transmissions were able to be sent to the WiFi server. The success rate of these transmissions was 100% according to the data captured with Wireshark.

As an additional test, the same voltage measurements were done for an extended period of time, until the mote sends an additional transmission. This test emulates the behaviour of the mote and supercapacitors on a continuous work cycle (Figure 14).

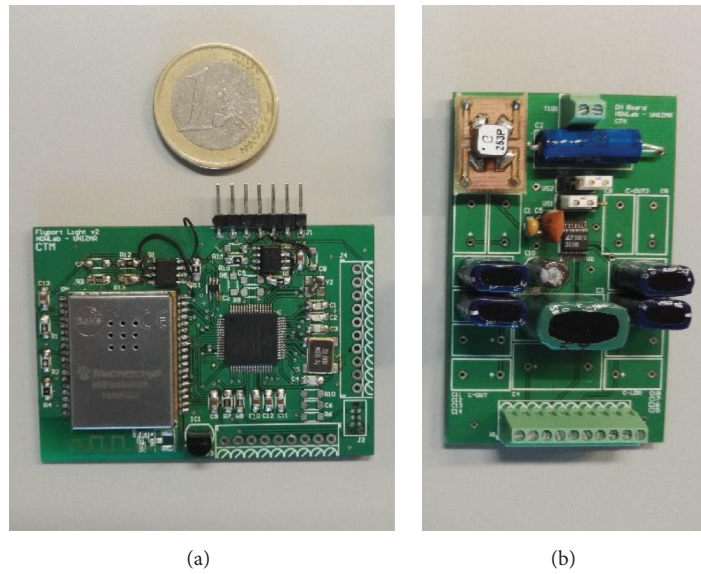


FIGURE 12: Prototype boards of the mote, with the load (a) and EH block (b). Both boards are missing some components as they are for future usage.

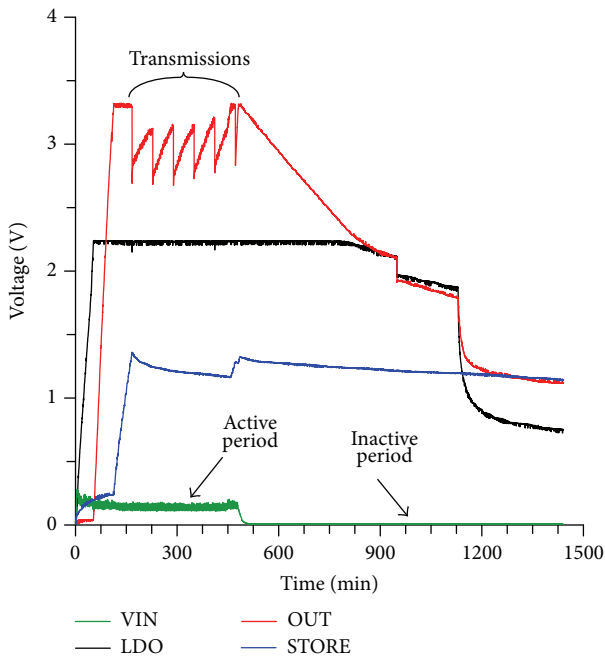


FIGURE 13: 24-hour actual home scenario test of the mote.

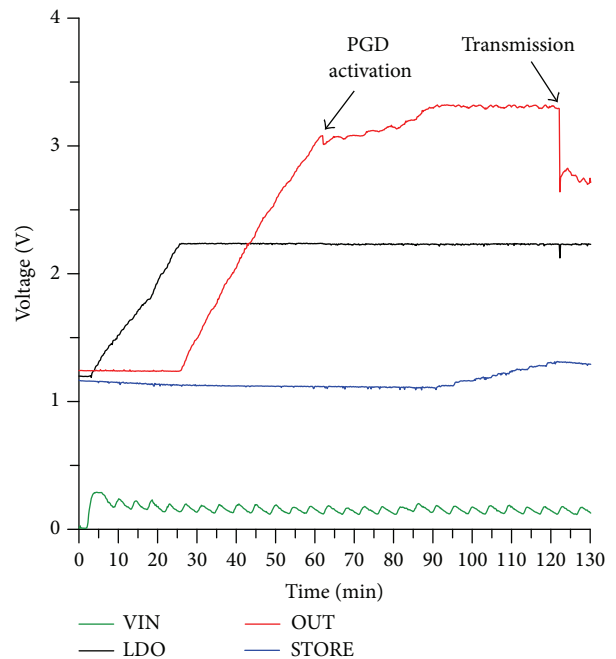


FIGURE 14: Extended actual home scenario reboot test of the mote.

With this test, it is possible to see the faster reboot of the mote back to operation (approximately 40 min.), compared to the initial start-up. This increase in charge time allows for more energy to be accumulated in the STORE supercapacitor that can be used to recharge the other outputs faster and reserve more energy for the next day of operation. Potentially, this extra energy reserve will allow for an even faster reboot on the next day of operation. Also, having a faster reboot grants more transmissions than at the initial start-up.

4.6. *Mote Sustainability.* Sustainability can be defined as the capacity of a system, device, or application to endure for a given time period, whether it is definite or indefinite. In applications such as the current proposal, sustainability can be divided into two areas, operating and energy. These will constrain the application under a specific operating window. Under a given operating cycle time frame, the energy sustainability is determined by two factors: the amount of energy generated at the outputs by the EH block and

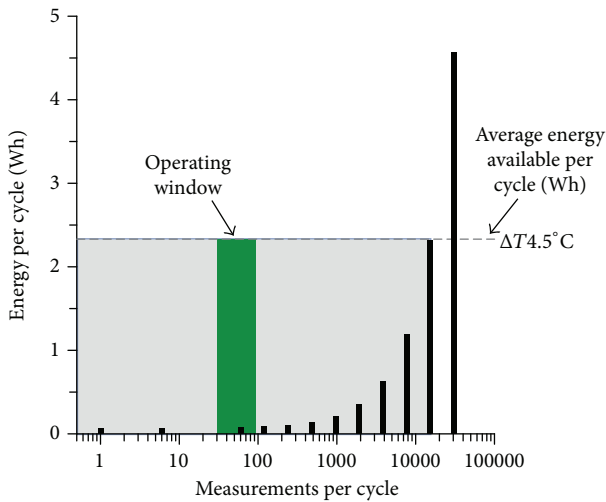


FIGURE 15: Energy and operating sustainability graph of the mote for different measurement scenarios. The grey area depicts the maximum amount of measurements with the average energy. For this study, a cycle is considered to be 1 hour.

the energy consumed by each activity of the load, as well as their energy consumed while being inactive. On the other hand, the operating sustainability is defined by the minimum amount of temperature measurements that will provide valid information to the user and the maximum amount of measurements that can be done with the useful energy stored in the supercapacitors of the MCU.

As stated previously, the initial setup condition of the mote is an operation cycle time frame of 1 hour, where a single data transmission is done. Given the characteristics of the energy management IC, output capacitors for the MCU and transceiver of 200 mF each were selected. This provides enough energy for each activity and an adequate start-up time. Given these conditions, a sustainability analysis was done to find the proposed operating window which will define the best application scenarios for this proposal. It is important to note that this analysis only considers the stable regime, as in the charge regime there are no activities done (Figure 15).

In Figure 15, based on the experimental measurements (Table 1), calculations were made to obtain the amount of energy consumed by a wide number of samples in a single cycle and a single transmission. Additionally, the average amount of energy available at the LDO output, at a 4.5°C temperature difference in the specified time cycle, was extracted.

In Figure 15, two main areas can be depicted, one gray colored and another green colored, all being referenced to the 4.5°C average energy level. The grey section symbolizes the maximum amount of measurements that could be done with the average energy available in one hour. Yet, given the constraint of the supercapacitor size, not all of the energy will be used for this purpose, but instead, it will remain stored as backup in an energy reservoir at the STORE output. Having said that there is a limit set by the supercapacitor size, given our initial conditions, the green area comes into place,

depicting the optimum operating window of scenarios for the current proposal. The minimum limit set for the green area was defined by the amount of samples required to provide useful information to the user. With a minimum of thirty samples per cycle, it is possible to provide a good sense, albeit a bit rough, of the temperature variations measured, although more samples are recommended.

5. Discussion

As described earlier, one of the key differentiators of this proposal is the integration of WiFi communications with energy harvesting on a sensor mote. Yet, the described device presents similarities with other proposals.

The TEG and EH blocks can be compared to the one used in the Tyndall ZigBee mote, submitted by Wang et al. [16]. In their work, several proposals and devices were analysed so as to select the best approach for their implementation. Specifically, a comparison is made with the LTC3108 IC, device used in the current work, but only with a 1:100 turn ratio transformer which, as also demonstrated here, presents a low efficiency at its main OUT output. However, when analysing this output with a 1:50 turn at 3.3 V, the same voltage used in their mote, it has been demonstrated that it is possible to have an efficiency of up to 51%, compared to the 25.2% achieved by their EH block. At the minimum, in this work, an efficiency of 40% is accomplished. If this EH block were to be used with the Tyndall ZigBee mote, only 2.6 mW would be required to be generated by the TEG, as the EH block would generate 1.1 mW at the 3.3 V output. This represents almost a 50% reduction in energy extracted from the ambient. Additionally, the use of a device such as the energy management IC brings the added benefit of having a general purpose EH block, which may be used for harvesting other types of ambient energies.

If ZigBee communications were to be used, instead of WiFi for this implementation, lower start-up times and energy levels could be achieved, decreasing the size of the required supercapacitors. Yet, as previously stated, it would still require the placement of ZigBee specific infrastructure and an additional device which would upload data to the cloud, such as the work of Kelly et al. [18] or Nugroho and Sahrioni [20]. This would represent an added economic cost and, because of its uncommon use by the general population, a less user-friendly setup. The advantage that WiFi presents against other protocols such as ZigBee is that having a network infrastructure already in place, as in the majority of households, this can decrease the economic cost of a project and simplify its implementation, as well as the interaction with users.

Another similar approach is the one presented by Nguyen and Le-trung [19]. In their proposal, they also use low power hardware and software techniques with WiFi communications for sensing data in smart buildings, using the same MRF24 transceiver as the one proposed here, and a PIC18 MCU. Yet, they present similar energy consumption, even though in this proposal a PIC24 MCU is used. One of the main reasons for this is that in this work the supply voltage of the MCU was lowered from 3.3 V to 2.2 V, which inherently

lowers its consumption. Also, the use of a cold start-up with the internal LPRC oscillator helped improve the energy demand. Moreover, in this work, sensor measurements can be done every minute, although the transmissions are by default set to run every hour. Another key difference is that for their implementation they use batteries ($4 \times 4200 \text{ mAh@3.7 V}$) to achieve a maximum operation of 46 days, whilst in this proposal EH is used which could potentially have no limit of operation. In order to compare both architectures, if we would power our mote with this pack of batteries, we would have 71 days of lifetime.

Seeing that there was enough energy generation to store a part of it (Figure 13), several possibilities are opened. If enough energy is generated by the TEG, it may be possible to increase either the amount of sensor measurements or the transmission rate, creating a more adaptable mote to different operation cycles. Also, the size of the STORE supercapacitor could be increased, which would additionally help in a faster reboot time on each sequential work cycle.

In the 24+ hours' mote tests, it was proven that the implementation is a viable solution to the current problematic. Ideally, it would be desirable to start sensing data as soon as the LDO output has reached its nominal 2.2 V, as this would enable the MCU which manages the temperature sensor. Currently, this is addressed with a faster reboot time with the energy stored after the 8-hour active period; yet, in the first few days of operation, there is some data loss. A possible improvement would be to add an additional start-up circuit that analyses the LDO output directly. This would leave the PGD pin free to be analysed by the MCU, giving it knowledge of the energy availability for the transceiver.

Further analysing Figure 15, with a lower energy availability than the one provided by a 4.5°C temperature difference, it could be possible to work under these same operating windows. Yet, with such an energy output, the initial start-up time for the mote would be increased. On the other hand, having a higher energy availability would grant a quicker initial start-up time and more energy to store for backup. Also, it could be possible to increase the supercapacitors size, accommodating more measurements per cycle or even more transmissions.

A probable improvement to the presented proposal would be the replacement of the MCU, which has a high energy consumption in general. If a PIC24FJ128GA306 [33] MCU from the nanoWatt XLP family were to be selected, a notorious increase in performance could be achieved. This MCU presents a low deep sleep consumption of 10 nA, which consequently would allow for more energy to be stored at a faster rate. Also, its active state current consumption presents a lower value of 6.5 mA, decreasing the minimum size of the LDO supercapacitor to 58 mF. This would represent a reduction in capacity of almost 70%. Assuming the use of the same supercapacitors that are currently set, only 100 mF would be more than enough to cover its demand, decreasing greatly the start-up time. Also, the integration of an energy-aware firmware, as well as the selection of a MCU with a wider supply voltage range, would allow for decisions over each activity to be taken by the mote and a reduction in size of the output supercapacitors.

On the transceiver side, the transmission output power could be modulated according to the needed signal strength required to communicate with the access point. In the majority of home scenarios, it is possible that a 10 dbm output is not required, and decreasing it would improve the consumption greatly. Moreover, depending on the scenario, the UDP protocol could be used to decrease the transmission time and energy consumption, although data delivery would not be assured.

6. Conclusions

In this paper, an autonomous WiFi sensor for auditing home heating devices was presented. A complete analysis of the load was done, giving a clear understanding of the energy needs required. Also, theoretical calculations were made for the needed energy reservoirs, or supercapacitors, and the experimental validation of these was proven. Afterwards, a characterization of the TEG was accomplished, which allowed for the appropriate selection of components for the EH block. With the proper components, the efficiency and power capabilities of the EH block were demonstrated, achieving an increase in performance of 50% compared to other implementations. Finally, all blocks were put to the test as a whole in a practical scenario for 24+ hours, proving the motes' proper functionality in smart home environments.

To conclude, the use of autonomous WiFi sensors as a WSN solution in IoT not only is viable, but also simplifies its implementation thanks to its already widespread network and ubiquity in IoT devices. There are a wide variety of scenarios where WiFi sensors can be implemented to transfer environmental data to the cloud, without the need of additional network communications. Furthermore, it can be easily paired with EH technologies to cover its energy consumption or help recharge its primary battery system for an extended life span.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.


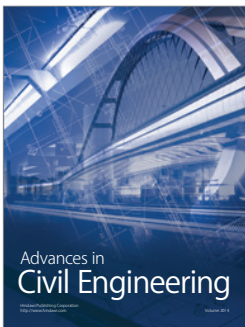
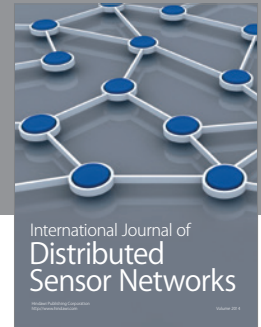
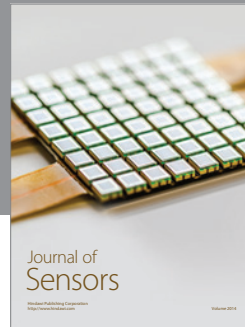
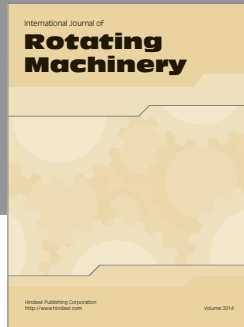
Acknowledgments

Trasviña-Moreno would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología of México for providing the scholarship for his Ph.D. Also, the authors would like to thank the Ministerio de Economía y Competitividad of Spain for Project Memory Lane (MeLa) which this proposal is a part of.

References

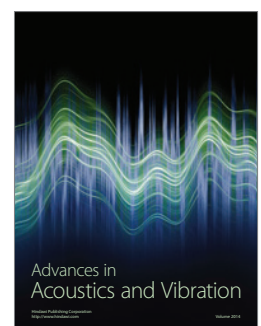
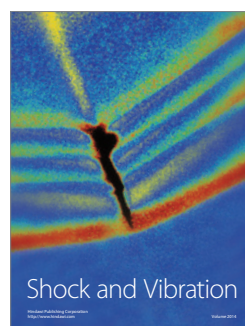
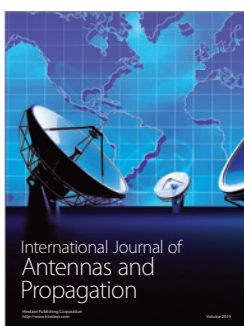
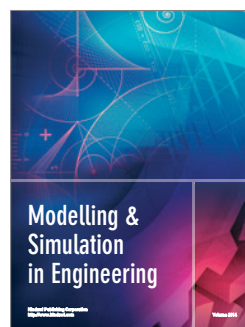
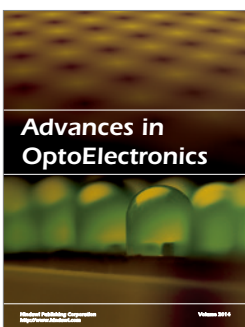
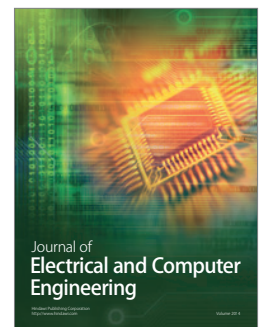
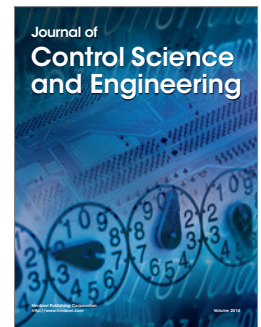
- [1] Instituto Nacional de Estadística (INE), "Censos de Población y Viviendas 2011 Datos detallados Principales resultados Principales indicadores Tamaño del hogar," 2011.
- [2] M. Zago, A. Casalegno, R. Marchesi, and F. Rinaldi, "Efficiency analysis of independent and centralized heating systems for

- residential buildings in Northern Italy,” *Energies*, vol. 4, no. 11, pp. 2115–2131, 2011.
- [3] O. Guerra Santin, “Behavioural patterns and user profiles related to energy consumption for heating,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 10, pp. 2662–2672, 2011.
 - [4] El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, *Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de Octubre de 2012 Relativa a la Eficiencia Energética*, Diario Oficial de la Unión Europea, 2012.
 - [5] IEEE, “IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.4: low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs),” IEEE Standard 802.15.4-2011, 2011.
 - [6] IEEE Standards, “Telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks—specific requirements Part 11: wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification,” IEEE 802.11, 2012.
 - [7] D. Niyato, L. Xiao, and P. Wang, “Machine-to-machine communications for home energy management system in smart grid,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 4, pp. 53–59, 2011.
 - [8] K. Malhi, S. C. Mukhopadhyay, J. Schnepfer, M. Haefke, and H. Ewald, “A zigbee-based wearable physiological parameters monitoring system,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 423–430, 2012.
 - [9] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif, and D. Tipper, “A survey on smart grid communication infrastructures: motivations, requirements and challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 5–20, 2013.
 - [10] H. Abdelnasser, M. Youssef, and K. A. Harras, “WiGest: a ubiquitous WiFi-based gesture recognition system,” in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM '15)*, pp. 1472–1480, Hong Kong, April 2015.
 - [11] S. Tozlu, “Feasibility of Wi-Fi enabled sensors for Internet of Things,” in *Proceedings of the 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC '11)*, pp. 291–296, IEEE, Istanbul, Turkey, July 2011.
 - [12] L. Sun, S. Sen, D. Koutsonikolas, and K. Kim, “WiDraw: enabling hands-free drawing in the air on commodity WiFi devices,” in *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '15)*, pp. 77–89, Paris, France, September 2015.
 - [13] A. S. Weddell, M. Magno, G. V. Merrett, D. Brunelli, B. M. Al-Hashimi, and L. Benini, “A survey of multi-source energy harvesting systems,” in *Proceedings of the Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE '13)*, pp. 905–908, Grenoble, France, March 2013.
 - [14] M. Piñuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, “Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 7, pp. 2715–2726, 2013.
 - [15] J. W. Matiko, N. J. Grabham, S. P. Beeby, and M. J. Tudor, “Review of the application of energy harvesting in buildings,” *Measurement Science and Technology*, vol. 25, no. 1, Article ID 012002, 2014.
 - [16] W. Wang, V. Cionca, N. Wang, M. Hayes, B. O’Flynn, and C. O’Mathuna, “Thermoelectric energy harvesting for building energy management wireless sensor networks,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, Article ID 232438, 14 pages, 2013.
 - [17] J. Han, C. Choi, W. Park, I. Lee, and S. Kim, “Smart home energy management system including renewable energy based on ZigBee and PLC,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 198–202, 2014.
 - [18] S. D. T. Kelly, N. K. Suryadevara, and S. C. Mukhopadhyay, “Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 10, pp. 3846–3853, 2013.
 - [19] M. Nguyen and Q. Le-trung, “Low-power and cost-effective wifi sensor motes for wireless embedded internet applications,” in *Proceedings of the International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC '14)*, pp. 441–445, Hanoi, Vietnam, October 2014.
 - [20] E. Nugroho and A. Sahroni, “ZigBee and wifi network interface on Wireless Sensor Networks,” in *Proceedings of the Makassar International Conference on Electrical Engineering and Informatics (MICEEI '14)*, pp. 54–58, Makassar, Indonesia, November 2014.
 - [21] Flyport WiFi b—OpenPicus Wiki, September 2015, http://wiki.openpicus.com/index.php/Flyport_WiFi_b.
 - [22] PIC24FJ256GA106—16-bit PIC® and dsPIC® Microcontrollers, September 2015, <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=PIC24FJ256GA106>.
 - [23] “MRF24WB0MA—rfPIC,” 2015, <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=MRF24WB0MA>.
 - [24] LTC3108—Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager—Linear Technology, September 2015, <http://www.linear.com/product/LTC3108>.
 - [25] “MSO2000/DPO2000 Mixed Signal Oscilloscopes/Tektronix,” 2015, <http://www.tek.com/datasheet/mso2000-dpo2000/mso2000b-series-dpo2000b-series-datasheet>.
 - [26] “DMM4050/4040 Digital Multimeter Digital Multimeters Datasheet/Tektronix,” 2015, <http://www.tek.com/datasheet/dmm4050-4040-digital-multimeter>.
 - [27] “TC-08 Thermocouple data logger/Pico Technology,” 2015, <https://www.picotech.com/data-logger/tc-08/thermocouple-data-logger>.
 - [28] LabVIEW System Design Software—National Instruments, September 2015, <http://www.ni.com/labview/>.
 - [29] C. A. Traviña-Moreno, A. Asensio, R. Casas, R. Blasco, and A. Marco, “WiFi Sensor Networks: a study of energy consumption,” in *Proceedings of the IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD '14)*, pp. 1–6, IEEE, Barcelona, Spain, February 2014.
 - [30] N. V. Desai, Y. Ramadass, and A. P. Chandrakasan, “A bipolar ±40 MV self-starting boost converter with transformer reuse for thermoelectric energy harvesting,” in *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED '14)*, vol. 14, pp. 221–226, La Jolla, Calif, USA, August 2014.
 - [31] H. Lhermet, C. Condemine, M. Plissonnier, R. Salot, P. Audebert, and M. Rosset, “Efficient power management circuit: thermal energy harvesting to above-IC microbattery energy storage,” in *Proceedings of the IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC '07)*, Digest of Technical Papers, pp. 62–587, San Francisco, Calif, USA, February 2007.
 - [32] Wireshark, September 2015, <https://www.wireshark.org/>.
 - [33] “PIC24FJ128GA306—16-bit PIC® and dsPIC® Microcontrollers,” 2015, <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?product=PIC24FJ128GA306>.



Hindawi

Submit your manuscripts at
<http://www.hindawi.com>



A network performance analysis of LoRa modulation for LPWAN sensor devices

Carlos A. Trasviña-Moreno, Rubén Blasco, Roberto Casas, Ángel Asensio

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain
{trasvina,rblasco,rcasas,aasensio}@unizar.es

Abstract. The rise in low power devices has created a necessity for connectivity among systems, in some cases across great geographic lengths. Current wireless communication protocols for these devices cover only small areas or require several hops to communicate. LPWAN have surfaced to cover this necessity offering greater transmission range in energy efficient protocols. Among these can we find the LoRa technology, offering wide spread spectrum modulation for WSN. The most common implementations of LoRa work at 868 MHz frequency range, and there is few information for other frequency bands. Given the nature of this modulation, it is of great interest to analyse lower frequencies. In this article a direct comparison of LoRa in the 868 MHz and 433 MHz will be done. Additionally, several parameters will be modified to find the best configuration available. This will help validate the possibility of transmitting at longer distances than current 868 MHz implementations.

Keywords. LoRa modulation, long range communications, LPWAN, Wireless Sensor Networks, M2M, low power communications, IoT.

1 Introduction

A Wide Area Network (WAN) can be defined as a data communications network that covers a broad geographic area [;Error! No se encuentra el origen de la referencia.]. Usually these types of networks help interconnect different Local Area Networks (LAN), Metropolitan Area Networks (MAN) and other architectures. Within the WAN, a new paradigm is defined as Low-Power Wide Area Network (LPWAN) which aims to cover the necessity of long range transmissions, comparable to cellular technology, and low power wireless nodes [2] in Machine-to-Machine (M2M) communications. These LPWAN provide new possibilities for and Wireless Sensor Networks (WSN) and the Internet of Things (IoT), as its increased coverage allows for the interaction of low power devices across great geographic lengths. Yet, as no network architecture is ideal, to be able achieve these capabilities LPWAN provide lower data rates than that of standard WAN.

Among the LPWAN, there are several interesting proposals which use different transmission techniques such as ultra-narrow band modulations, for instance SigFox,

Random Phase Multiple Access Direct Sequence Spread Spectrum (RPMA-DMSSS) technology used by Ingenu, or Weighthless which offers several different modulations [2,3,4]. Another proposal is the Long-Range (LoRa) modulation, which appears as one of the most promising technologies, offering a wide band spread-spectrum modulation with low-cost transceivers [2,5]. In addition, it offers a high immunity to interference with a co-channel GMSK rejection of up to 20 dB. Its transmission frequency ranges from 137 MHz to 1020 MHz, granting worldwide functionality in free-band.

In WSN, application scenarios can be very diverse. It is common to find cases where devices communicate from near ground level to higher points and vice versa. Such is the case of this proposal where several slave wireless sensor nodes will be deployed near a shoreline, and will be communicating to a master node in a vantage point. Under such conditions, the theoretical calculations tend to diverge from the practical results as the deployment scenario presents a less than ideal characteristics for wireless communications.

Although there are many valid LPWAN implementations that could function for the application scenario of this proposal, the focus of this proposal will be the LoRa spread spectrum modulation. Within this modulation, several studies have been made regarding modulation at 868 MHz [6,7], yet in other frequency bands little information can be found. The main objective of these analyses is usually to find the range limitations of LoRa modulation under given conditions. Although this is also of great interest for the application scenario, it is important to first compare with other frequency bands that could potentially increase the communication range.

With this in mind, the main objective of this article is to analyze the LoRa spectrum modulation at 433 MHz, making a direct comparison with 868 MHz under a similar scenario as the one described earlier. To demonstrate this, the current proposal is divided in various sections: hardware design, test environment & setup, test and results, discussion and conclusions. With this a full comprehension of the experimentation, as well as LoRa behavior, should be attainable granting the reader a clearer understanding of this modulation's capabilities for IoT implementations.

2 Hardware Design

To benchmark the LoRa modulation, a RN2483 wireless module from Microchip was selected [8]. Internally, this unit integrates a PIC18LF45K22 and a SX1276 transceiver which enables the comparison between low and high frequencies [9]. Although LoRaWAN [10,11,12] is integrated by default in the wireless module, a custom firmware was created for this architecture with the capability of implementing a star network topology.

The wireless module was then mounted on a simple PCB, which enabled access to the module thru serial port communications. To properly configure the transceivers,

there are three main configuration parameters that must be modified to achieve different transmission distance, data rate and noise immunity. These are the spreading factor, signal bandwidth and coding rate. The first two are the most significant as they influence the receiver sensitivity and the transmission data rate, albeit in different degree. The spreading factor parameter helps increase significantly the sensitivity of the receptor at the cost of bitrate. The higher the spreading factor, the further the transmissions and the lower the bitrate. Contrary to this, increasing the bandwidth allows for a higher data rate but slightly deters the sensibility of the receiver. Yet, as the theory explains, decreasing the bandwidth also increases the error in a channel [13]. Lastly, the coding rate grants different levels of redundancy to the transmission, helping improve immunity to noise of the signal. This parameter should be modified depending on the environment of the deployment, as increasing the coding rate will increase the transmission time due to additional overhead.

3 Test environment & setup

As the main objective of this study is to compare the LoRa modulation at 433MHz and 868MHz, and not the longest possible transmission range attainable, two sites were selected with a moderate distance between them. The objective is to have a separation between transmitter and receiver, which by theoretical calculations should be able to communication at both frequencies.

Even though the final deployment scenario of the nodes is to be at a shoreline, for practicality reasons it was thought better to test in a different scenario that maintained a similarity in height difference between the devices. Also, for the experimentation an environment with a direct line-of-sight was sought out, which is another of the key features of the deployment scenario.

All of the tests were done at the outskirts of Zaragoza, Spain. The receiver was located at ground level in coordinates 41.592466, -0.948032, and the transmitter was set at an elevated point in coordinates 41.530340, -0.954572. The separation between these two points is of approximately 7 km and the elevation differences is of roughly 300 meters (Fig. 1).



Fig. 1. Distance between both test points and its topographic profile. Point A represents the transmitter station at a vantage point and point B the receiver station at ground level.

In both cases, the modules were configured through a serial port connection, which also served as a monitor for transmitted and received data. For the trials, a series of transmissions of sequential data and unique identifiers were sent in a systematic manner. This not only allowed verifying the reception of the data, but also viewing the Received Signal Strength Indicator (RSSI) of each package and the integrity of said transmissions.

4 Test and Results

Given that the LoRa is based on frequency spectrum modulation, one of the most defining of the three configuration parameters is the spreading factor. Thus several trials were made where the spreading factor was tested at different configurations. Additionally as the bandwidth also incurs in the sensitivity of the receiver, this parameter was modulated across the extent of its range. The coding rate was kept at its highest configuration value to minimize radio interference and to have a clearer understanding

of the impact of the other parameters. For all the trials the RSSI, the successfully received packets, packets with errors, Packet Error Rate (PER) and Packet Error Loss Rate (PELR) was extracted, giving a better understanding of the channel activity. From here on, the different spreading factors will be referred to as SF12 (4096 chips/symbol), SF10 (1024 chips/symbol) and SF8 (256 chips/symbol).

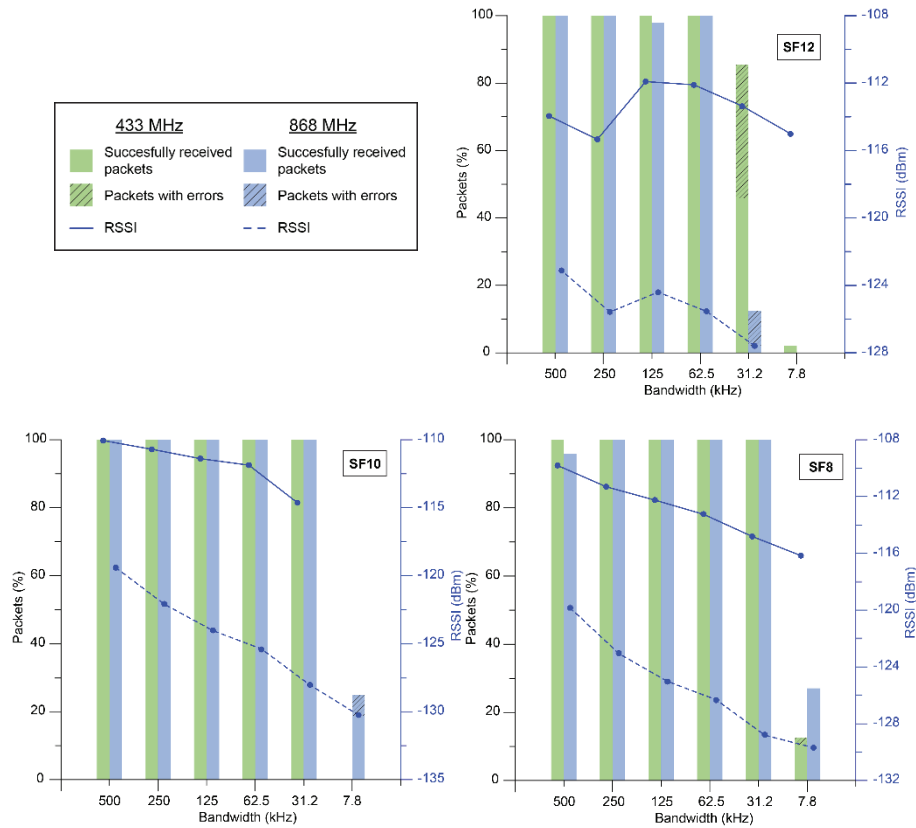


Fig. 2. Graphics for the different SF depicting the successfully received packets, packets with errors and the average RSSI per trial. Cases where there were complete packet loss show no RSSI.

Table 1. PER and PELR percentages for SF12 modulation.

BW (kHz)	Frequency (MHz)	RSSI	Received packages %	PER %	PELR %
500	433	-113,95	100,00%	0,00%	0,00%
250	433	-115,34	100,00%	0,00%	0,00%
125	433	-111,91	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	433	-112,10	100,00%	0,00%	0,00%

31,2	433	-113,36	85,42%	46,34%	14,58%
7,8	433	-115,00	2,08%	0,00%	97,92%
500	868	-123,12	100,00%	0,00%	0,00%
250	868	-125,58	100,00%	0,00%	0,00%
125	868	-124,40	97,92%	0,00%	2,08%
62,5	868	-125,54	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	868	-127,59	12,50%	83,33%	87,50%
7,8	868	0,00	0,00%	0,00%	100,00%

Table 2. PER and PELR percentages for SF10 modulation.

BW (kHz)	Frequency (MHz)	RSSI	Received packages %	PER %	PELR %
500	433	-110,06	100,00%	0,00%	0,00%
250	433	-110,70	100,00%	0,00%	0,00%
125	433	-111,39	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	433	-111,87	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	433	-114,63	100,00%	0,00%	0,00%
7,8	433	0	0,00%	0,00%	100,00%
500	868	-119,41	100,00%	0,00%	0,00%
250	868	-122,1	100,00%	0,00%	0,00%
125	868	-124,04	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	868	-125,39	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	868	-128,04	100,00%	0,00%	0,00%
7,8	868	-130,25	25,00%	25,00%	75,00%

Table 3. PER and PELR percentages for SF8 modulation.

BW (kHz)	Frequency (MHz)	RSSI	Received packages %	PER %	PELR %
500	433	-109,81	100,00%	0,00%	0,00%
250	433	-111,31	100,00%	0,00%	0,00%
125	433	-112,25	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	433	-113,25	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	433	-114,81	100,00%	0,00%	0,00%
7,8	433	-116,16	12,50%	16,67%	87,50%

500	868	-119,84	95,83%	0,00%	4,17%
250	868	-123,06	100,00%	0,00%	0,00%
125	868	-125,02	100,00%	0,00%	0,00%
62,5	868	-126,31	100,00%	0,00%	0,00%
31,2	868	-128,81	100,00%	0,00%	0,00%
7,8	868	-129,69	27,08%	0,00%	72,92%

In Figure 2 and Tables 1-3 the different trials and comparison among the results for 433MHz and 868MHz can be viewed. A fourth experimentation was also done, with a spreading factor of 64 chips/symbol, yet the results were a complete packet loss in the grand majority of the trials in both frequencies, thus they are not shown due to the lack of comparability.

With the information provided by the experimentation, it can be noticed that at 433MHz the RSSI is greater than that of 868MHz, with the exception of the scenarios with complete packet loss, across the full extent of the experimentation. As the spreading factor is decreased, the average RSSI also diminishes. Additionally in the trials in which the bandwidth was lowest, the interference in the channel was very elevated causing an increase in the PER and PELR factors. In some cases, a complete packet loss was detected.

5 Discussion

With the results shown in the previous section, several conclusions can be extracted. As seen in Figure 2, by decreasing the operating frequency of the transceivers it is possible to achieve a greater sensitivity which, ideally, can be translated to data being transmitted over greater distances. Increasing the spreading factor helps achieve this goal, yet with the experimental results we can see that at SF12 greater error and packet loss percentage are displayed in lower bandwidths. It is in fact the SF10 configuration that has the best average RSSI of all with a low packet error/loss percentage.

In Tables 1-3 it is possible to see that at lower bandwidths there is an increased PER and PELR percentage. Not only is there a noticeable packet loss, but also the majority of the packets received present data corruption, which increased the PER. In this case, data corruption was recognized if the sequential string was not the one expected or if the unique identifiers were not present.

From the theory, it is possible to assume that by lowering the signal bandwidth it is conceivable to achieve a better, or at least the same, results as in higher bandwidths. Yet seeing as how a narrower bandwidth also incurs in channel noise, it was not possible to achieve a better result mainly because of the selected environment. Due to the nature of the physical location of the receiver end, it is possible that a certain degree of

signal cancelling was afflicting the trials, either by the environment or by other variables. Ideally both the transmitter and receiver should be located at elevated points where Fresnel conditions are met [7]. Such a setup would greatly improve the outcome of the trials and, possibly, would have granted a better outcome with a SF of 64 chip/symbol.

Although 433 MHz presented a better response in the majority of the trials, there is one which stands out due to its poor results. In trial 6 of Table 2 a complete packet loss is presented in 433 MHz, whilst in 868 MHz some data was still received. This could have been due to a high occupancy of the channel at the time of the trial. This is one of the major issues of working in free-band frequencies, as it can present an elevated channel traffic which may impact the signal transmission. If a LoRa network is desired to be deployed and it does not have time or energy constraints, it is recommended that the highest CR is selected as it will grant the highest interference immunity. Ideally the selected environment should be analyzed for radio traffic so as to select the appropriate CR and reduce the on-air time of the data.

6 Conclusions

As seen in the tests, with a SF of 1024 chips/symbol it is possible to achieve some of the highest RSSI value. This configuration allows for a high sensitivity in the receiver, thus increasing the feasible transmission range. Although if the distance between the two transceivers is moderate, such as the one presented in this paper, a SF of 256 chips/symbol is also a viable configuration.

For both SF's the modulation of the bandwidth only slightly deterred the RSSI. Thus, it is best to use the 125 kHz configuration as it presents the best balance between receiver sensitivity and data rate. For scenarios where greater channel immunity or an increased data rate is required, due to energy or time constraints, it is recommendable to use a higher bandwidth.

Utilizing the 433 MHz frequency allows for an increased RSSI over the standard 868 MHz and a reliable signal channel. Having a greater sensitivity in the receiver also implies that a greater transmission distance could be achievable from those attained with 868 MHz. The usage of 433 MHz offers the possibility of creating a multi-purpose and multi-region enabled IoT network that may cover wide geographic areas with a just a few nodes.

Future work

Given the results shown in this proposal, further tests were also done with the 433 MHz frequency band to test the transmission range. These measurements, in conjunction with node energy consumption and data-to-energy metrics, are to be compiled to

be presented to the scientific community. Additionally, the deployment of the WSN at the shoreline application scenario, with its corresponding results, are also to be reported to the public.

Acknowledgments

Trasviña-Moreno would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) of México for providing the scholarship for his Ph. D. In addition, the authors would like to acknowledge the Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada of México for project Sistema Multipropósito para Monitoreo del Medio Ambiente, and the Ministerio de Economía y Competitividad of Spain for projects Memory Lane (ref. TIN2013-45312-R) and Movilidad Verde Inteligente (ref. RTC-2014-2425-4) which this proposal is part of.

References

1. Internetworking Technology Handbook - DocWiki, http://docwiki.cisco.com/wiki/Internetworking_Technology_Handbook#WAN_Technologies.
2. Sanchez-Iborra, R., Cano, M.-D.: State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *Sensors*. 16, 708 (2016).
3. Margelis, G., Piechocki, R., Kaleshi, D., Thomas, P.: Low Throughput Networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations. *IEEE World Forum Internet Things, WF-IoT 2015 - Proc.* 181–186 (2016).
4. Andreadou, N., Guardiola, M., Fulli, G.: Telecommunication Technologies for Smart Grid Projects with Focus on Smart Metering Applications. *Energies*. 9, 375 (2016).
5. Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., Zorzi, M.: Long-Range Communications in Unlicensed Bands: the Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios. *IEEE Wirel. Commun.* 1–7 (2015).
6. Petäjajarvi, J., Mikhaylov, K., Roivainen, A., Hänninen, T., Pettissalo, M.: On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology. *ITS Telecommun. (ITST), 2015 14th Int. Conf.* 55–59 (2015).
7. Aref, M., Sikora, A.: Free space range measurements with Semtech LoRa technology. In: 2014 2nd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS-SWS 2014. pp. 19–23 (2014).
8. RN2483 - Wireless Modules, <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483>.
9. SX1276 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver | Semtech, <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1276/>.
10. Vazquez-gallego, F., Member, S.: Goodbye, ALOHA ! 2029–2044 (2016).
11. Stočes, M., Vaněk, J., Masner, J., Pavlík, J., Things, I., Agriculture, P., Agriculture, S.: Agris on-line Papers in Economics and Informatics Internet of Things (IoT) in Agriculture - Selected Aspects. VIII, 83–89 (2016).
12. Pham, C.: Deploying a pool of long-range wireless image sensor with shared activity time. 2015 IEEE 11th Int. Conf. Wirel. Mob. Comput. Netw. Commun. WiMob 2015. 667–674 (2015).
13. Semtech .: LoRa™ Modulation Basics. 1–26 (2015)

Article

Unmanned Aerial Vehicle Based Wireless Sensor Network for Marine-Coastal Environment Monitoring

Carlos A. Trasviña-Moreno ^{1,*}, Rubén Blasco ¹, Álvaro Marco ¹, Roberto Casas ¹ and Armando Trasviña-Castro ²

¹ Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza, Zaragoza 50018, Spain; rblasco@unizar.es (R.B.); amarco@unizar.es (Á.M.); rcasas@unizar.es (R.C.)

² Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada Unidad de La Paz, La Paz 23050, Mexico; trasvi@cicese.mx

* Correspondence: trasvina@unizar.es; Tel.: +34-876-555-464

Academic Editors: Felipe Gonzalez Toro and Antonios Tsourdos

Received: 31 December 2016; Accepted: 20 February 2017; Published: 24 February 2017

Abstract: Marine environments are delicate ecosystems which directly influence local climates, flora, fauna, and human activities. Their monitorization plays a key role in their preservation, which is most commonly done through the use of environmental sensing buoy networks. These devices transmit data by means of satellite communications or close-range base stations, which present several limitations and elevated infrastructure costs. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) are another alternative for remote environmental monitoring which provide new types of data and ease of use. These aircraft are mainly used in video capture related applications, in its various light spectrums, and do not provide the same data as sensing buoys, nor can they be used for such extended periods of time. The aim of this research is to provide a flexible, easy to deploy and cost-effective Wireless Sensor Network (WSN) for monitoring marine environments. This proposal uses a UAV as a mobile data collector, low-power long-range communications and sensing buoys as part of a single WSN. A complete description of the design, development, and implementation of the various parts of this system is presented, as well as its validation in a real-world scenario.

Keywords: remote sensing; WSN; UAV; LPWAN; LoRa; marine monitoring; low power electronics

1. Introduction

Ecological monitoring is an area of great interest for remote sensing, mainly due to the increased concern for the preservation of the environment, as well as the impact of climate change and human activity. Diverse implementations have been widely used in fields such as forest monitoring [1,2], wildlife preservation [3,4] and agriculture monitoring [5,6].

Another field in which remote sensing has played a key role in recent years is the marine environment. It is probably one of the most important areas in ecology, as changes in this environment directly impact the biodiversity and atmospheric conditions, as well as any fishing-related activities [7–9]. Moreover, it is also one of the harshest settings to monitor for any type of deployment, as it requires waterproof robust technology to endure the high levels of humidity and salinity, wave collisions, and extreme weather conditions [10]. The way in which marine environments have been monitored has changed little in the past few decades, with the majority of implementations being based on satellite imagery, underwater devices with various sensors, and buoy developments. The latter are by far the most commonly used, being mostly applied to ambient variable measurement, either as stationary or drifting devices, each with its own specific purpose. These devices can measure several variables simultaneously and monitor areas for long periods of time. Currently, there are at least 1354 stations and 1421 drifter buoys deployed globally, according to data from the

National Data Buoy Center [11] and The Global Drifter Program [12] correspondingly. Yet one of the main drawbacks of using buoys is the process for data extraction. The most common methods are long-range communications, close-range wireless transmissions, or dry-land data collection. Long-range transmissions require either a previously established infrastructure, such as a ground base station, or satellite connectivity. When using a ground station, the buoys must be fixed to a given position, or several stations must be established for drifting buoys. Additionally, these types of wireless communications tend to have a range limited to less than 100 m per ground station, thus the high usage of satellite communications. In the case of short-range communications and dry-land data collection, an aquatic vessel is required to reach the buoys and either extract the data or the buoy itself. All the previously mentioned methods are hardly sustainable due to expenses associated with monthly fees, maintenance, or person-hours.

Currently, one of the most novel approaches for monitoring marine environments is the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV). These devices can cover areas several km wide, given their long-range communications, enabling the possibility of monitoring hard to reach areas with relative ease, as well as acquiring similar data than that of satellite imagery. In this last area, its contributions highly benefit from the possibility of extracting data at a higher resolution than satellites, but in contrast they may only cover smaller areas of analysis [13]. Additionally, as they are airborne devices, UAVs do not face the same challenges as marine monitoring deployments. Implementations using these types of devices have been used for wildlife [14–17], environmental [18,19], and hazardous marine monitoring [20]. Usually the data type acquired by a UAV in a marine implementation are those that can be collected using infrared, multispectral, or conventional cameras, yet environmental data are, for the most part, unattainable. Moreover, given their short life span of tens of minutes and the need for user interactions, monitoring for extended periods of time is difficult to achieve, as it would require several landings and battery replacements.

To overcome the limitations of UAV and buoy based implementations, the use of a hybrid Wireless Sensor Network (WSN), which uses both technologies, is proposed in this article. This type of UAV assisted WSN system architecture has become increasingly used in the past few years, given recent advances in both areas. In the agricultural sector, these type of implementations have been used to monitor crops remotely, by using a UAV as a data collector [21,22] and, in some cases, as a trigger for countermeasures against pests [22]. Similarly, the use of UAVs has been proposed as a means of managing disaster situations, in conjunction with both WSN [23,24] and cellular networks [24,25], which presents several improvements over current implementations. In other areas, such as the entertainment sector, UAV assisted WSN have been proposed to provide enhanced user experiences in various types of events, such as music concerts or sports [26].

In aquatic environments, similar approaches as the one proposed in this article can be found in the literature, such as the work of Zolich et al. [27] and Barbatei et al. [28]. Zolich et al. propose the use of a UAV to collect data from stationary low-cost and low-power consuming buoys, which provide data regarding various underwater sensors. To transmit data to the UAV, they used an 868 MHz radio module which implements the Tiny Mesh protocol, with a power consumption of 24 mA in reception and 560 mA in transmission, both at 3.3 V. In their experimentation, they were able to transmit with a maximum data rate of 4399.97 bps and a data link range of 485 m, whilst the UAV was hovering at approximately 9 m above sea surface. Barbatei et al. use a similar system architecture with a UAV as a data mule and custom designed modular stationary buoy devices, which house a temperature sensor, an Inertial Measurement Unit (IMU), GPS module, micro SD storage, and a wireless transmitter, all managed by a 16 bit microcontroller. The wireless transmitter used in their implementation is a Radiocrafts RF1280 module, which transmits at 868 MHz frequency with a FSK modulation with an estimated data rate of 4.8 kbps. According to their study, this provides an approximate range of communications of 264 m with the UAV, with a low current consumption of 21 mA in reception and 28 mA in transmission, and a 3.3 V voltage supply.

The system proposed in this article aims to use a swarm of drifting buoys, contrary to static ones presented in the previously mentioned work, as primary environmental sensors, covering wide areas of seashore, and a UAV as a data sink and dynamic network router. The use of drifting buoys makes the use of short-range communications with the UAV completely unviable, thus, to be able to locate and extract the data with a UAV, it is desirable to have long-range communications to simplify their interaction. The selection of a proper wireless communication protocol to fully integrate these devices is paramount. There are several possibilities for these type of transmissions, yet the recent development of the Low Power Wide Area Network (LPWAN) protocols present new opportunities with the benefits of a reduced energy consumption and moderate data rate [29,30]. One of the most promising technologies in LPWANs is the LoRa spread spectrum modulation, which has been proven to be able to communicate data across several kilometers with a low power consumption [30–33]. The unique modulation of this technology not only offers the possibility of transmitting below the noise floor, but has also a high resilience to external interference [34]. As a slight drawback, similar to most LPWANs, the LoRa technology presents a limited transmission bitrate, which is sufficient for most sensing applications although not ideal for high data streaming. Having stated the capabilities of the LoRa modulation, as well as the requirements of the application, it can be seen that it seems to properly suit the necessities of this implementation, avoiding the use of satellite or GSM communications, as well as additional cumbersome infrastructure.

In the following sections of this paper a full description of the proposed system and its functionalities are encompassed. Afterwards, from both a hardware and firmware perspective, the architecture of the system is analyzed, as well as the custom network layer protocol designed for this implementation. Finally, the description of a series of trials, their methodology, a field test for the validation of the system, a discussion of the results, and the final conclusions are explained.

2. SIMMA Functional Overview

The implementation of this multi-device solution was sought out to cover the necessities of the SIMMA research project in Mexico. The aim of this project is to monitor different variables in the Mexican shoreline, using low-power and low-cost sensing buoys which can be scattered across a wide area. The buoys, as stated before, are to be used mainly as drifting devices, although a scenario where they are used as stationary buoys, by anchoring them to the seafloor, has also been contemplated within this project. To be able to access their data, a UAV is to be used as a mobile data harvester and network manager. By design, UAVs can be controlled across great lengths using different wireless communications, using mostly different types of UHF transmissions for video and flight data feeds, as well as flight controls. To be able to act as a network router, it was important to select a wireless communication technology which would not affect the operation of the UAV, as any interference could have catastrophic consequences. One of the key characteristics of LoRa is its unique modulation, which allows its coexistence and operation with other RF technologies presumably without interference [34], thus the use of this type of transmission seems adequate for its interaction with the UAV and its multiple radio modules.

Under the SIMMA project, there are two main functional scenarios: data extraction and search and rescue. In both cases, the buoys will be periodically collecting data regarding water temperature, wind speed and its GPS coordinates, as well as air temperature, pressure, and humidity. In the data extraction scenario, after the buoys have been set on the shore line and ambient variables have been collected, the UAV will fly in the last known direction of the buoys, periodically searching for them. Once the buoys have been found, the UAV will start transmitting data acquisition messages to collect the data stored in the buoys. After the completion of this task, or if it starts running low on battery, the UAV will return to home. Given that the buoy recruiting and data collection process is fully automated, to be able to monitor the network activity of the SIMMA system, a secondary optional ground station can be set on the beach. This ground station will not interact with the UAV, it is only meant to be used as a network analyzer or sniffer (Figure 1).

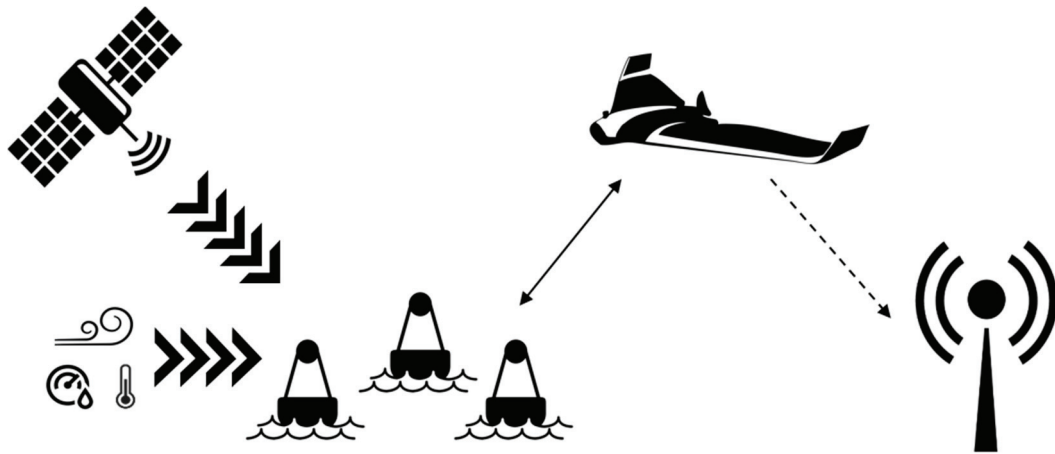


Figure 1. System interaction amongst the different devices of the network. The straight-line arrow indicates the main data transmission flow, the dashed arrow represents the communications with the optional ground station and the others indicate the environmental input to the buoys.

In the search and rescue scenario, the UAV will be used to locate missing buoys that may have drifted away from the rest of the swarm. Given that the buoys may be either stranded or in a distant location, the UAV will be flown in the suspected direction of the buoys and will try to collect the position of any buoy in its path before its return to home. This functionality simplifies the recovery of the buoys, which, in many cases, are lost to strong currents or vandalism [10,35,36].

3. SIMMA System Architecture

As stated previously, for this proposal a multi-device solution was implemented to try and cover the different necessities of the SIMMA project. Two distinct hardware were developed with LoRa wireless communications: the control node and the sensor node. The control node functions either as a network master, mounted on the UAV, or as a network monitor in a ground station; the sensor node hardware can only be placed inside the buoy (Figure 2).

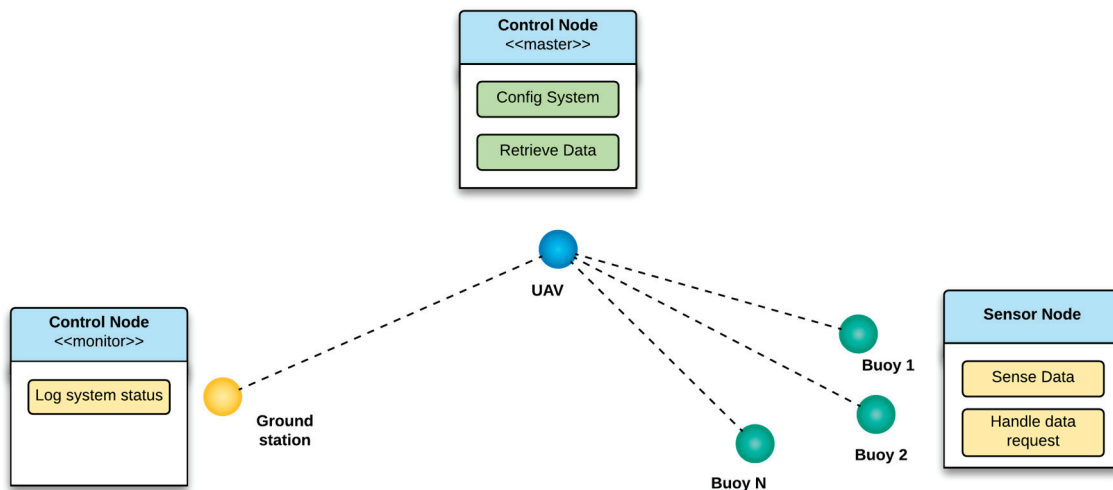


Figure 2. Functionality of the hardware developed for the SIMMA project.

For both hardware, a firmware was developed with a custom network layer protocol which will be referred to as LoRaNET. Additionally, to be able to interact with the SIMMA system, a Graphical User Interface (GUI) was also developed to simplify the process of configuration and mode switching. When using a base station as monitor, the GUI may also be used to display the system's activity. The design and implementation of the previously mentioned hardware, firmware, network layer protocol, and GUI were developed by the authors at the Universidad de Zaragoza, Spain.

Given the complexity of the system, and to better explain the full functionality of this proposal, this section has been divided in various subsections covering the electronic hardware, software, firmware, and the GUI. Moreover, the description of the UAV and buoys used in the implementation is also covered.

3.1. LoRaNET

The implementation of a design specific network layer protocol was sought out given that the current LoRa protocol, LoRaWAN [37], does not include the functionality for the transceiver in the 433 MHz frequency band, which is the operating frequency that is to be used for the SIMMA project. Moreover, there is less flexibility while configuring the LoRa settings which may increase the transmission range, as well as a high packet overhead which incurs directly in the power consumption.

LoRaNET is a proprietary network layer implementation, designed for this specific proposal, which uses the LoRa modulation, oriented for ultra-low power WSN, where the synchronization needs and bandwidth are not elevated. LoRaNET is able to implement a star network topology and defines two simple types of nodes:

- Master node: Creates and manages the network, assigning network addresses to the other nodes and centralizing the message traffic;
- Slave node: Any other node that is part of the network.

Every time a LoRa network is created, a series of basic parameters are established for its functionality. Within these parameters are the network ID, the maximum wait time for an answer within the network, the maximum wait time for a node to leave the network after the last message, and the number of attempts a message can be re-sent if there is no acknowledgment of message reception. These parameters must be adjusted accordingly with the LoRa RF settings, which alters the transmission range, as the time on air of a message may vary greatly.

Once the network has been created, the master node can recruit any slave node within its reach as long as it is not part of any active network. If a message can be answered by several slave nodes simultaneously, as when recruiting, scanning the network or with any type of broadcast message, the answer is sent in pseudo-random intervals, reducing the possibility of RF packet collisions.

When a slave node has been recruited, the master assigns him a 2 byte unique ID in the network, which is associated with the device's MAC address. If for any reason a slave gets disconnected, upon reconnection it will be assigned the same ID. The master node will always be assigned the 0x0000 address, and the 0xFFFF address is reserved as a broadcast identifier.

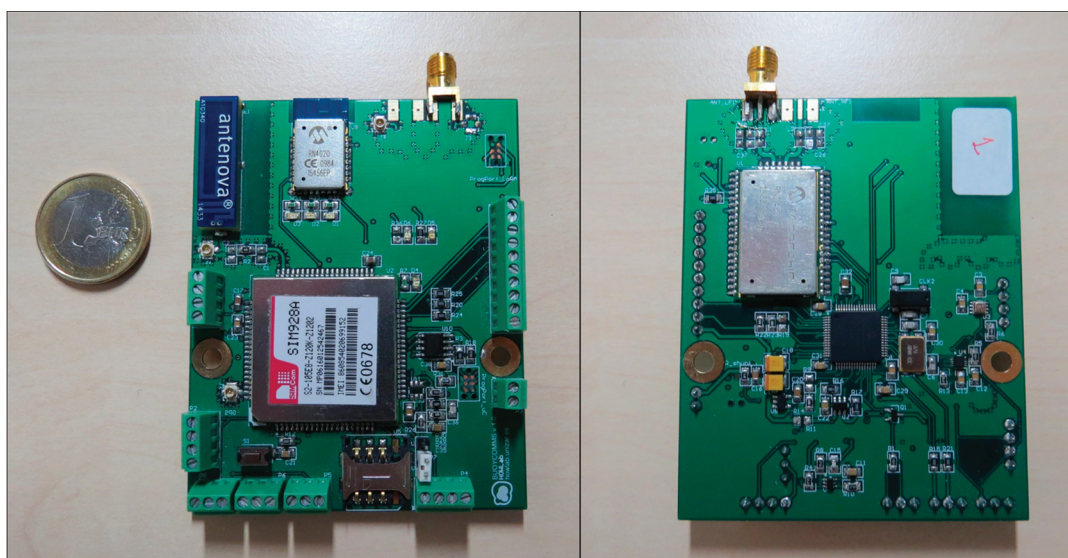
In the Table 1, a summary of the main commands implemented in the current version of LoRaNET is shown.

Table 1. Network device commands implemented in LoRaNET.

Category	Name	Description
Commands for slave nodes which are not in a network	Recruiting	Message used by the master node to convey to the other nodes that they are allowed to join the newly created network
	Request to join	Nodes that received the recruiting message may request to join the network
	Response to a join	Answer given to a slave node from a master node after a request to join
	Beacon	Slave nodes that are not in a network may send this message to transmit their location or data relevant to the application
Commands associated to network maintenance tasks	Ping	Transmits a ping to a slave node in the network
	Request to leave net	The master node requests a slave node to leave the network
	Event leave network	Notification message of a node that left the network
	Scan network	The master node sends a scan network petition to the 0xFFFF address (broadcast), to which any node in the network answers
	Synchronism request	The master node transmits its time (GPS) to all nodes in the network
Commands associated to messaging	MAC ACK	Message sent as a confirmation of message reception
	Data message	Main data message, with a maximum payload of 128 bytes

3.2. Sensor Node

For this part of the implementation, a custom designed PCB was employed. The main processing unit is a 16 bit PIC24FJ128GC006 microcontroller [38], which manages all the peripherals and communications. Given its architecture, it offers several low power configurations that can be used to increase the life span of the device. For the wireless communications the RN2483 transceiver was selected [39], as it offers the possibility of transmitting data in a wide range of frequencies with the LoRa modulation. Additionally, the board was suited with an 8 Mbit flash memory and a SIM928A GPS and GSM integrated circuit [40] (Figure 3).

**Figure 3.** Design of the PCB for the environmental sensing buoys.

It is worth noting that these PCBs, as shown in Figure 3, have additional devices integrated in the board, such as a Bluetooth modules, accelerometers and SIM card ports for the GSM module. These ICs and modules, although not currently used, are intended for future use and other functional scenarios, providing additional functionality to the boards.

Given that these PCBs are intended to be used as ambient sensor nodes, an external BME280 sensor for measuring air temperature, humidity, and pressure [41] was included. Additionally, they also incorporate a 1773 anemometer [42] and an insulated DS18B20 temperature sensor for water measurements [43]. These devices are all connected to the PCBs through the different terminal blocks present in the design, and are managed by the microcontroller through I2C, One-Wire, or digital communications (Figure 4). Moreover, the sensor nodes were coupled with a 433 MHz omnidirectional passive antenna with a 50 ohm impedance.

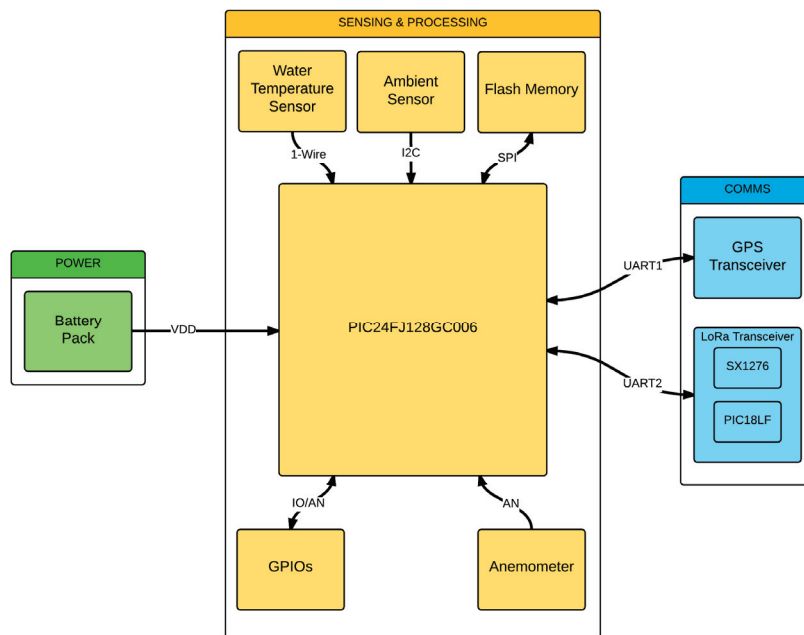


Figure 4. Block diagram of a sensor node’s peripheral connections.

The sensor node functionality can be summarized in two high level tasks: sensing data and handling requests. The first of the tasks is the simpler of the two and will be carried out periodically, depending on how the node is configured. The handling request task manages all the LoRa incoming messages, whether it is a data transmission or configuration activity (Figure 5).

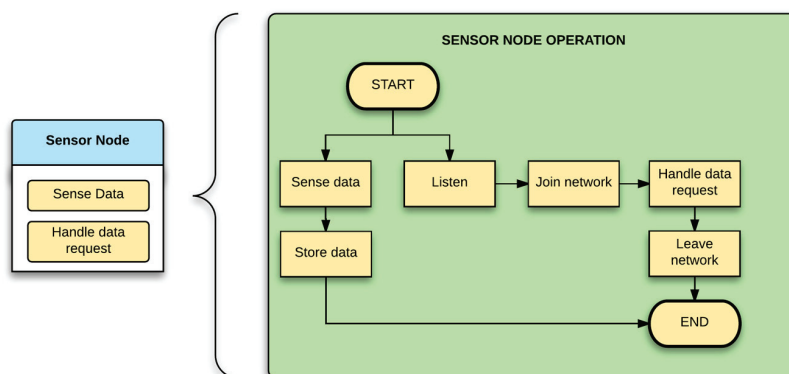


Figure 5. Sensor node’s task diagram.

Within the configuration activities, the sensor node's LoRa RF settings and the device's operating configuration can be set by the master node through the LoRa communications. The first of these are used to modify the transceiver's internal registers, which alter the transmission frequency, spreading factor, coding rate, and channel bandwidth [44,45]. These settings will determine the range and data rate at which transmissions will be made, as well as the level redundancy used to add robustness to the transmission and avoid interference that could be found in the environment. On the other hand, the device operation configurations are the ones that implement the buoys' functionality, which includes the data capture frequency and the time period in which the LoRa transceiver will be turned on. This last feature is thought for scenarios where the buoys will be left for several days at the sea, and the data collection with the UAV would be done periodically at certain hours of the day. This helps reduce the energy consumed by the sensor node and, in consequence, extends its lifespan. All of the sensor nodes can be reconfigured to the initial start-up settings, either by command input or a physical hardware reset button.

As the sensor node is thought to work for extended periods of time, low power consumption modes were directly implemented. Although these modes are always present, the longevity of the devices will be directly impacted by the data capture frequency. At higher frequency intervals, the device will capture almost complete streams of data, but will only last a short period of time and vice versa.

3.3. Control Node

The hardware for this device was based on the BeagleBone Black (BBB) board [46], which has an AM335x 1 GHz ARM[®] Cortex-A8 microprocessor, 512 MB of DDR3 RAM and 4 GB of 8-bit eMMC on-board flash storage. The BBB was selected, given that the control node is meant to function as a network gateway in an IoT scenario. Its communication capabilities have been augmented by integrating a custom designed cape (IoT cape), which has a built in RN4020 Bluetooth module [47], an ETRX357 Zigbee module [48], and a LoRa SX1276 transceiver [49]. With the inclusion of the IoT cape to the BBB design, an intelligent device that could manage various WSNs and link them to the IP world was created (Figure 6).

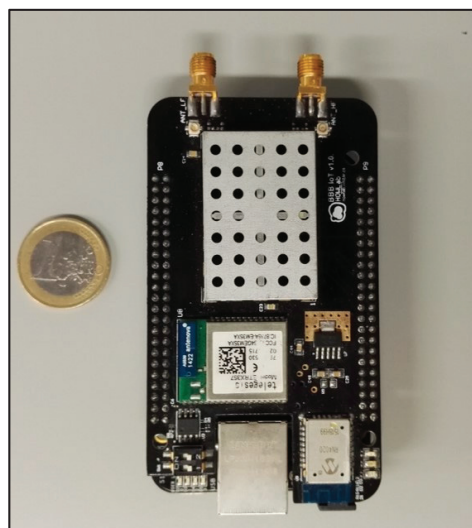


Figure 6. Control node: BeagleBone Black and IoT cape.

Its programming has been implemented following a modular approach based on the Open Services Gateway initiative (OSGi) [50] (Figure 7). OSGi defines a framework where pieces of code are organized into bundles that can be managed separately (e.g., installed, updated, removed, etc.). These bundles are agents which might be dedicated to specialized tasks, such as handling a serial port

or providing a command line interface. Moreover, they communicate and interact with each other by means of services which are published within the framework, which are available to each bundle.

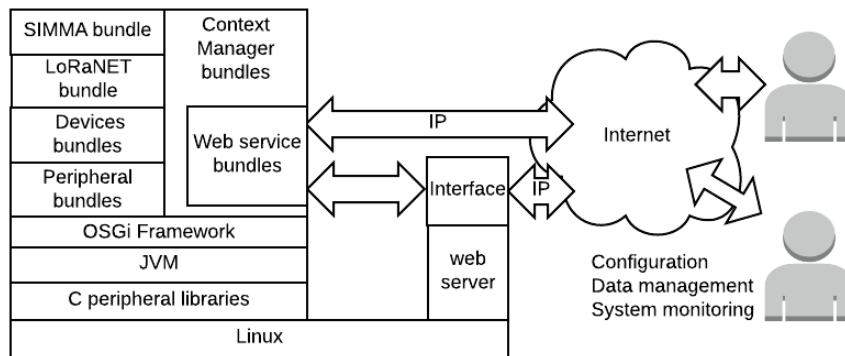


Figure 7. Control node software architecture.

Although several bundles are implemented in this application, to better understand the functionality of this device, the following must be described:

- Peripheral and device bundles: Enable the usage of the diverse communication transceivers present in the IoT cape, publishing them in the framework. They are composed by two layers: the peripheral and the device layer. The former gives access to the ports and communication interfaces—such as GPIOs, UARTs, SPI and I2C—so that they may be accessible from the framework. The former provides the methods to configure and manage each of the transceivers;
- LoRaNET bundle: Implements the LoRaNET network layer, providing the methods to manage or connect to an existing network;
- SIMMA bundle: Defines the application layer and the main functionality of the device;
- Context Manager (CM) bundle: Manages and stores the data originating from the sensor nodes, guaranteeing its allocation in the data base, as well as its access from external systems through a Representational State Transfer (RESTful) API or the direct data processing in the platform. This same API has been enhanced to enable control, configuration and notification of events from a remote interface (external to the OSGi framework).

Additionally, this device also functions as a UI which accesses the historical data of the sensor nodes, through the CM, to convey commands or configure the system.

Depending on their role, the control nodes can be configured either as masters or monitors. A master node is responsible for creating and maintaining the network, assigning network addresses to the other nodes and centralizing the message traffic. The master node functionality can be summed up in two types of tasks, one for configuring the system and another for retrieving data. In the former, the master node is able to change the LoRa RF settings of the network it will create, configure the sensor nodes with these same settings and modify the sensor nodes operating configuration, mentioned in the previous section. In the latter task, the master node is able to retrieve relevant data from the sensor nodes and store it in its memory. The monitor nodes, on the contrary, may only function as information providers to the users, with the single task of reporting the activities of a master node when it is onboard the UAV without any interactions (Figure 8).

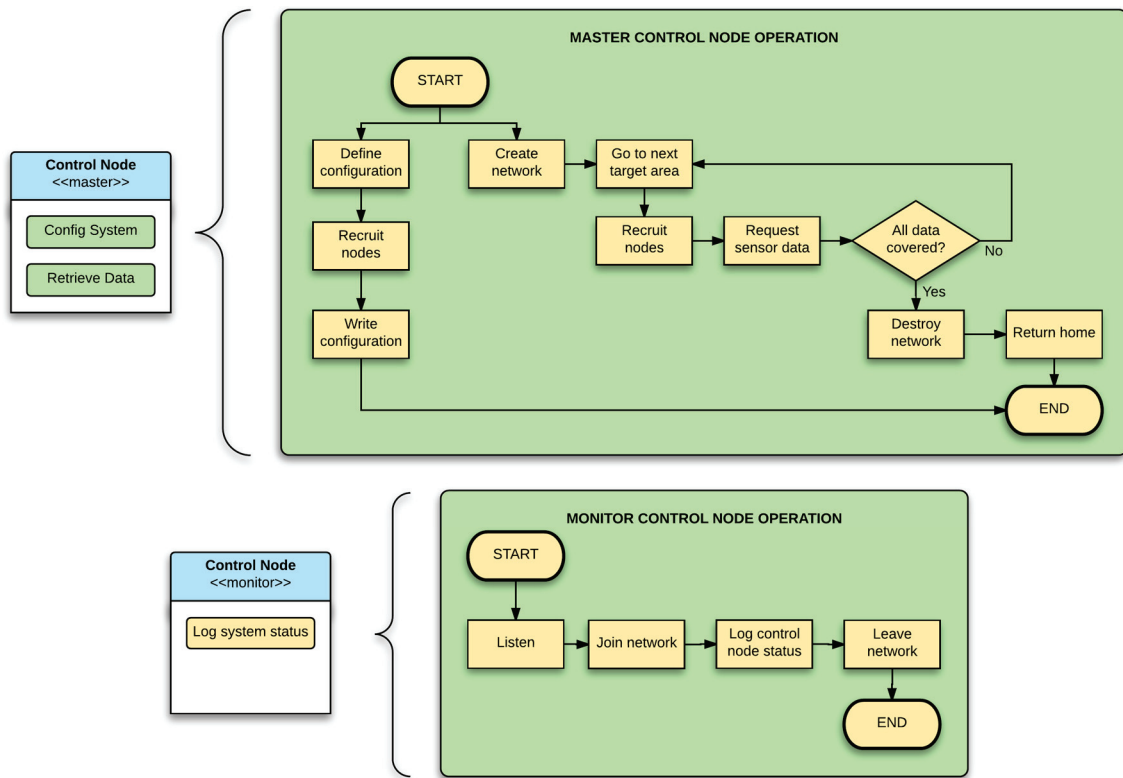


Figure 8. Control node’s task diagrams.

3.4. Buoy Design

The buoys are based on a design of the Davis drifter buoy, which has an “X” style sail and four flotation devices. This design is commonly used in oceanographic surface monitoring, given its ease of implementation and the ability to use the surface layer water currents to move (Figure 9).

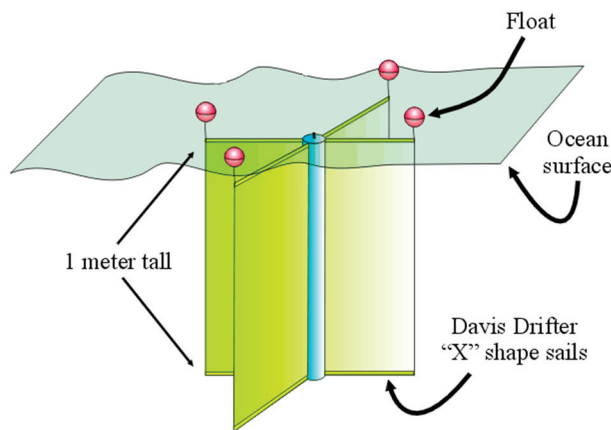


Figure 9. Davis drifter buoy design. Modified from <http://www.ims.uaf.edu/NPRBdrifters>.

The central structure of these particular buoys was made of hydraulic PVC, the sails from sheets of plastic canvas and the flotation devices from rigid styrofoam. These buoys were built and developed by the Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) from Mexico, which is part of this project.

In the upper central part of the buoy, an additional PVC tube was added to the central structure, where the slave node’s electronics were housed. Furthermore, the anemometer was fixed at the top, as

well as the BME280 sensor which was contained inside of a 3D printed housing which allowed the flow of air while avoiding any water intakes to get through to the sensor. A proper air exchange is required for an accurate reading of the BME280, otherwise the sensor will measure different values than that of the actual ambient. This upper structure of the buoy will be floating above the surface of the water, allowing GPS and LoRa communications (Figure 10).



Figure 10. Upper part of the buoy where the electronics are housed and the external sensors are fixed.

Given that this upper section of the buoy contained electronics, it was extremely important to avoid any water intakes. To try and circumvent this, the electronics were also placed in an IP67 case, and all of the connection cables for the exterior sensors that had to pass through the PVC structure were sealed with a waterproof silicon-based resin.

3.5. UAV Design

The UAV is based on a Delta Wing design, built with a foam frame with two carbon fiber rods across the wings for reinforcement and with a wingspan of 2 m. This type of design is ideal for remote areas, as it does not require a specific landing area, due to its belly pan landing system, and it is light enough (4.2 kg with battery and electronics) to be launched by hand or a small launchpad (Figure 11).



Figure 11. Delta Wing UAV used in the SIMMA project.

The UAV is equipped with a Panda II autopilot system kit [51], which includes a GPS receiver module, three-axis MEMS gyros, three-axis accelerometer, three-axis magnetic sensor, a barometric pressure sensor, and an airspeed meter. This system provides a high precision flight control with three different operation modes: manual, AFSS activated (active stabilization), and autopilot. The autopilot can be controlled and configured with the use of the GCS software provided by the manufacturers. This software provides a graphical interface which provides real-time data for various flight parameters of the UAV and an electronic map for waypoint navigation. To communicate the GCS with the UAV, an FY-605 wireless data radio at 462.125 MHz is utilized [52], providing an extended transmission range of up to 15 km. Moreover, the UAV has a 900 MHz First Person View (FPV) video transmitter, with its corresponding integrated camera, and a UHF Long Range System (LRS) receiver at 455 MHz. These last two wireless modules are used to control the UAV in manual mode with a radio controller.

Taking into consideration the UAV's battery weight, servos, and electronic systems previously mentioned, the aircraft is able to carry approximately 600 g of payload. Given that the master node, its housing, and battery pack weigh roughly 360 g, the UAV is able to fly a maximum of 40 min, with the possibility of adding further peripherals. It is worth mentioning that this device was also provided by the CICESE Institute.

3.6. SIMMA Graphic User Interface

The GUI is a single page web application built with Angular 2 [53] that was designed specifically for its use in this project as a configuration and visualization tool. The selection of a web-based interface was sought out to avoid installing custom software on the client's equipment and, thus, reducing the compatibility issues amongst different operating systems, as well as providing a self-contained solution (Figure 12).

To access its features, the control node must be connected through a network interface and afterwards, in a web explorer, access its predefined IP address. As the BBB provides connectivity through a Virtual Ethernet Port interface over USB, it is possible to connect this device through this serial port to any computer, simplifying its usage.

Having accessed the interface, the user is able to configure a control node as a master or monitor. In master mode, the functionality of the GUI becomes far more complex, as it allows the user to not only configure the master node, but also the sensor nodes through interactions with the master. There are two modes of operation for the master node: manual and automatic. For configuration in a laboratory or a ground station, the manual mode must be selected, as it allows the user to set the LoRa RF settings of the master node and slave nodes (sensors and monitors), as well as the operation settings of the sensor nodes. Moreover, in this mode the user can manage the data from the sensor nodes, downloading or deleting them, and graphically visualize all the downloaded sensor data, as well as exporting them in several formats (xml, json, csv, or kml). The automatic mode is used when

the node is to be mounted on the UAV, having previously configured the rest of slave nodes with the same RF settings.

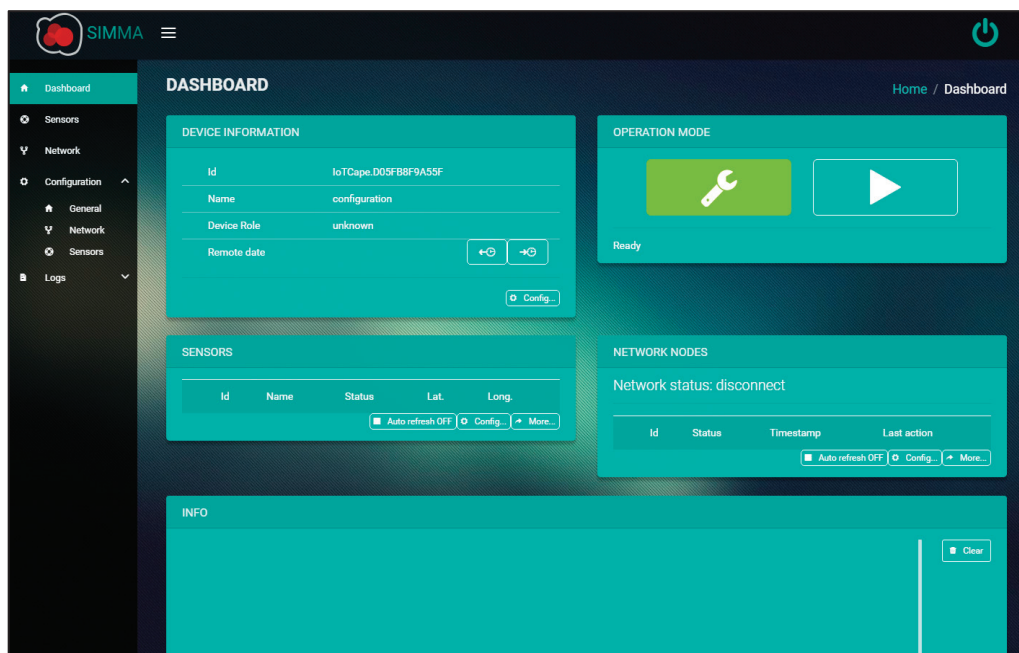


Figure 12. Graphical user interface screenshot.

When in monitor mode, the user is able to view the complete message log of the master node in real-time, including the localization of sensors nodes, network activities, and data extraction process. To be able to view a given master node, the monitor node must also be configured with the exact same LoRa RF configurations.

4. Experimentation and Results

4.1. Objectives

The main objective of a system field test, as with any application, is to validate its complete functionality and identify possible improvements. Yet, given the complexity and amount of device interactions in the SIMMA system, several tests were required prior to its validation as a whole. The objectives of these tests were to:

- Validate the LoRa wireless communications amongst the control nodes and sensor nodes;
- Verify the proper stability and functionality of the control nodes and sensor nodes;
- Analyze the LoRa communications behavior in a similar environment to the final field test, and its interaction with the UAV's transceivers.

4.2. Methodology

As the LoRa communications play a key role in the system, it was one of the first things that needed to be tested. As stated previously, the LoRa modulation has been widely studied and its achievable range proven, yet its operation at 433 MHz has not been analyzed in detail. This analysis, and a comparison with the 868 MHz band, was done in a previous study [32], where several RF configurations were tested with a beta version of the sensor node communications block. From this experimentation, several LoRa RF configurations were selected for further technical testing.

With the control and sensor node hardware used in this article, stress and stability tests were done in a laboratory. Periodically, the sensor node would capture data from all the ambient sensors

and GPS module, store the data in its memory and await LoRaNET messages. The control node was configured to automatically create a network, search and recruit sensor nodes, and download their data. This was accomplished with the master node connected directly to the GIU. These tests were done several times, after fixing the identified coding errors, until the firmware and software of the devices were stable for the next trials.

To accomplish the third objective, several experimentations were deemed necessary. The first trial was done by transmitting a sequence of data packages across a shore line with both transceivers at sea level, trying to emulate LoRa transmissions in the worst-case scenario. For this trial, various LoRa RF configurations were tested, whilst maintaining the operation frequency at 433 MHz, as was required. Amongst these configurations, it was also possible to validate the spreading factor of 128 chips/symbol, bandwidth of 125 kHz, and coding rate 4/5 RF LoRa configuration, which was not verified in the first 433 MHz analysis. This last configuration test yielded an approximate transmission range of 5 km.

Afterwards, there was a need to verify if the LoRa transceiver communications would have any type of negative impact on the wireless communications used in the UAVs autopilot module, given the similar frequencies to the 433 MHz band. In the same location of the last trial, LoRa data packages were transmitted across the shore line whilst simultaneously transmitting with the UAVs FY-605 transceiver at 434 MHz to a computer with the GCS software. Although the FY-605 is to be used in the 462.125 MHz band, it was configured to 434 MHz to also emulate a worst-case scenario. Across the whole experiment, there was no visible interference in the GCS software or LoRa transmissions.

Even though this previous trial practically guaranteed that the LoRa master node could operate without interference, a final test was done to truly validate the communications in flight. This experiment was done using a sensor node placed on the ground, a network monitor node connected to a computer with the GUI and by mounting a master control node inside the UAV (Figure 13).

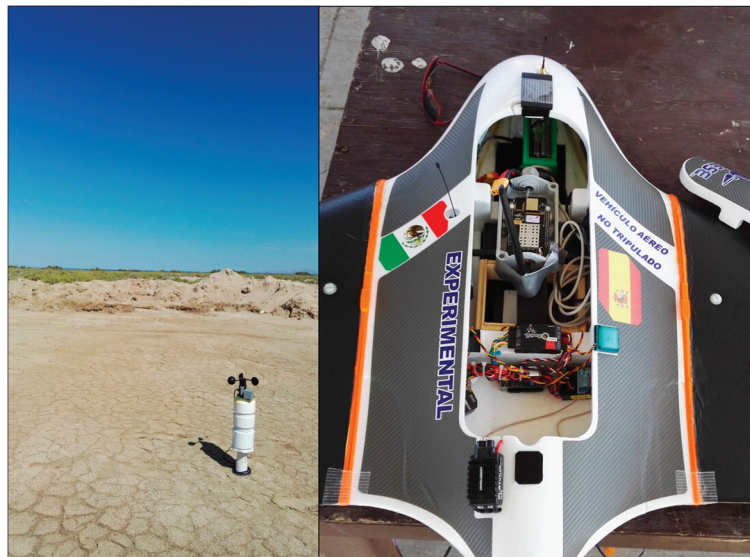


Figure 13. Initial flight test. To the left the sensor buoy placed on the ground and to the right the UAV with the master node mounted inside.

Having placed the master node in the UAV, the aircraft was flown in manual mode in close proximity to the sensor node in a circular pattern. This test granted the last successful validation of the system, prior to the final field test.

4.3. Field Test

For this last trial, a relatively controlled environment was needed to avoid any possible loss of the end devices. Thus the beach of El Tecolote (La Paz, B.C.S., Mexico) was selected, due to its ease of access and deployment. In this location, three buoys were placed approximately 60 m away from the beach (24.33657, -110.32229 UTM), with a separation of a few meters amongst each other, capturing environmental and positioning data every minute, granting high amounts of information in a short period of time (Figure 14).

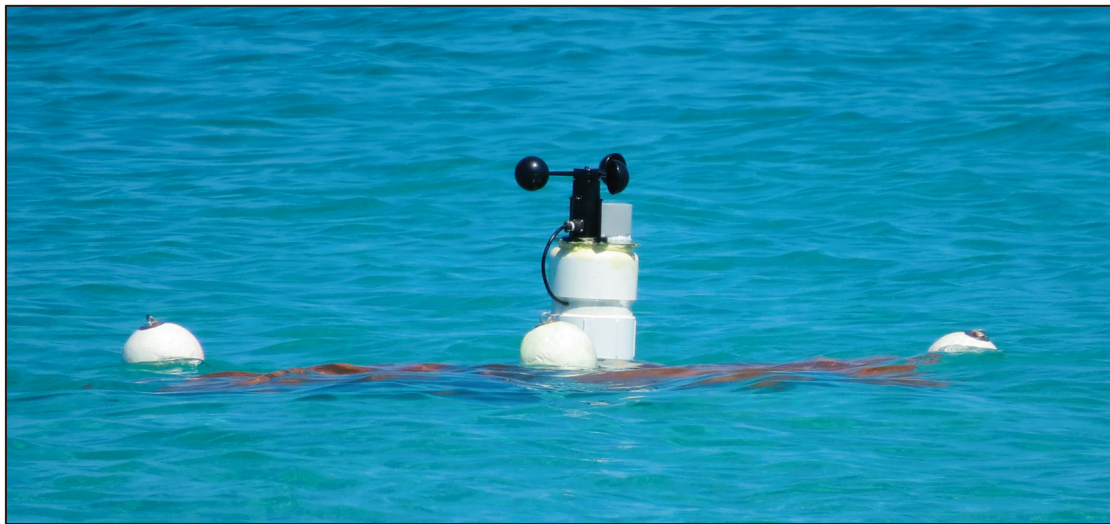


Figure 14. Drifting Davis buoy placed in El Tecolote (Mexico) beach for environmental data collecting.

Prior to their placement, all the slave nodes (sensor nodes and monitor) were configured at the 433 MHz frequency band, with a spreading factor of 128 chips/symbol, a bandwidth of 125 kHz and a coding rate 4/5, which provides a high data transfer rate at the expense of transmission range reduction, with only the minimum of noise immunity. The maximum amount of bitrate was estimated using tools and formulas provided by the transceiver's manufacturer [44]. Although with other LoRa RF configurations increased distances are attainable, these settings allow the validation of the systems functionality as a whole.

To verify the proper communication between the UAV and buoys, a network monitor was placed at the beach connected to a computer. Given that the buoys and the network monitor were fairly close to each other, once the network monitor lost the reception of data from the UAV, it could be inferred that the same would happen with the buoys. After a given time in which the buoys had collected enough data, the UAV with the master node was launched from the beach, in automatic mode, following pre-established waypoints (Figure 15).



Figure 15. UAV flight path for the trials at El Tecolote beach. The furthest waypoint was set at 8.62 km away from the launch area and the UAV flew at a maximum height of 30 m.

After the UAV had been launched, in the network monitor it could be viewed how the master node periodically located the three buoys and extracted the data. A sample of these can be seen in Figure 16.

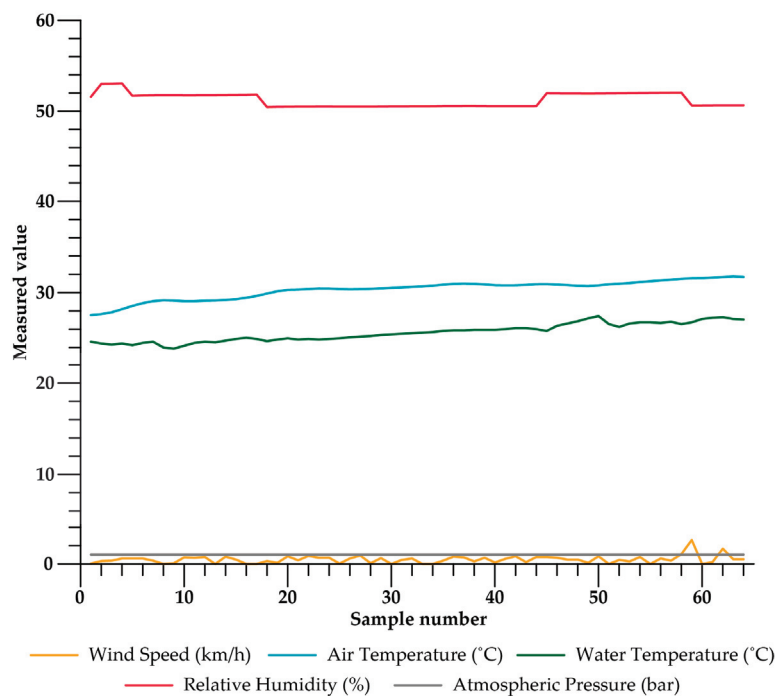


Figure 16. Data extracted by the master node from one of the buoys.

It is worth noting that the signal from the LoRa master node was lost at approximately 4 km in distance, which is reasonable given the LoRa RF configuration set on the end devices. As verified in the pre-field tests, the maximum expected range was 5 km. Additionally, in this trial the UAV was limited to a reasonable distance, although it is able to travel double the distance with battery to spare.

The buoys, which were closely located to the beach, only drifted approximately 50 m each since the surface layer currents at that location were very weak. Yet, since there was a constant communication with the master node which was viewed with the monitor node, it can be concluded that the system as a whole is a valid one.

4.4. Post-Field Test Analysis

After retrieving the buoys from the beach, each of these was opened to retrieve the sensor nodes placed inside. This revealed that in one of the three buoys there was a small hole in the PVC structure which allowed water to leak. Additionally, the IP67 case that housed the sensor node was missing a vital toric joint, thus water ended up filling the space where the sensor node was located (Figure 17).

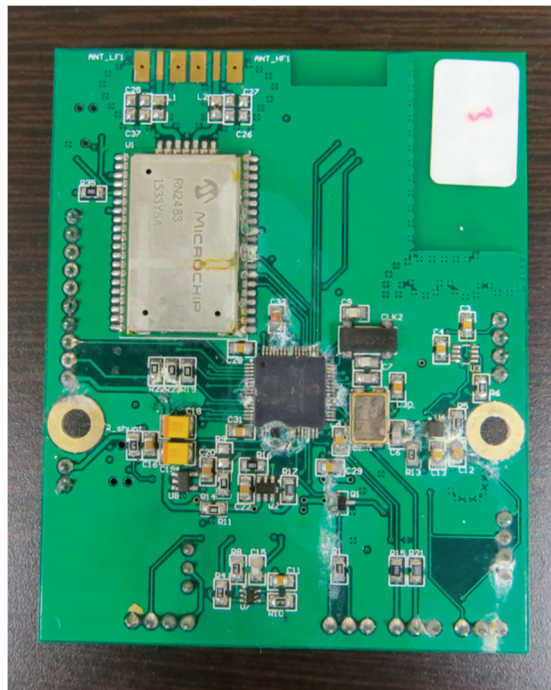


Figure 17. Water damaged sensor node.

This unexpected outcome suggests that the upper part of the buoy (Figure 10), although functional for the field test, requires further improvements to avoid this kind of results. Furthermore, in a small percentage of the samples extracted from the sensor nodes, a loss of GPS signal was detected. Analyzing Figure 14, it can be seen that part of the sensor node was below the sea surface, which may have been the reason for the GPS interference. Also, this might be the reason for the LoRa transmission loss at 4 km, instead of the expected 5 km. Although additional tests must be done, these results suggest that modifications should be made to the buoyancy, height of the upper part of the buoy or location of the GPS and LoRa antennas.

5. Discussion

Although the validation trial only tested the data extraction functional scenario, this controlled trial allowed the validation of each of the systems devices as a whole. Given that the search and rescue is the simpler functional scenario, by doing a data extraction the search and rescue was also

corroborated, as the first activity in the data extraction is the localization of the slave nodes and afterwards the recollection of their data, including the GPS position.

Analyzing the results obtained in the trials, and comparing them to the proposals of Zolich et al. [27] and Barbatei et al. [28], several improvements were achieved. In terms of wireless data transmissions, the use of LoRa communications was proven to reach a notably higher transmission range of 4 km with a data rate of 5.4 kbps, which is 10 times the range achieved by Zolich et al. with an increased data rate. This also further exceeds most buoy based wireless implementations, except for satellite communications, which present additional costs. Moreover, in the work submitted by Zolich et al. there was radio interference detected with a secondary radio transmitter mounted in the quadcopter, even though this transmitter and the TinyMesh radios operated at different operating frequencies (433 MHz for the latter, 868 MHz for the former). In the validation tests carried out, it was proven that no interference was detected in the UAV's flight communications by the LoRa transmissions, and vice versa. In terms of low power consumption, the RN2483 LoRa transceiver has a power consumption of 28.8 mA in transmission and 14.2 mA in reception, both at 3 V. In contrast with the radio used by Barbatei et al., which has a lower energy print compared to Zolich et al., the LoRa transceiver consumes less energy in both transmission and reception, even though its performance is similar. All of the previously mentioned facts translate to a lower energy consumption per data packet transmission, which in consequence increases the lifespan of a node, with a greater transmission range.

Even though the range limits of the LoRa modulation were not tested in this article, as these have already been validated in other studies [30–33,54,55], for scenarios where a greater transmission radius is desired, there are several things that must be taken into consideration for a proper deployment. Since any UAV is restricted to a finite amount of flight time, it is important to consider the bitrate of the LoRa transmissions, the frequency at which the environmental data is captured and the mode of operation of the UAV. By increasing the spreading factor of the LoRa devices the maximum transmission radius is increased, but consequently the bitrate is reduced. Furthermore, if the data capture frequency is high and the buoys have been left for an extended period of time, high amounts of data will be accumulated on each buoy. With these type of configurations it would at least be required to modify the flight plan of the UAV, first identifying the location of the buoys, then returning home and making a data extraction afterwards. An alternative to this would be to set the UAV for search and rescue mode and later extracting the data, either by collecting the buoys from their location, or to try and set a temporary base station near the buoys location with a master node (connected to a laptop) and manually download the data from the sensor nodes. It is worth noting that in a prior work [32], it was proven that by increasing the spreading factor to 256 chips/symbol transmissions could be done to a receiver station at approximately 7 km. Assuming that this same distance is achievable in a marine-coastal environment, with such a spreading factor, a bandwidth of 125 kHz and coding rate of 4/5, the bitrate would only be reduced to 3.1 kbps but effectively almost doubling the transmission radius. Such a configuration would still be viable for an elevated data capture frequency in the slave node and the mid-air data extraction with the UAV.

Another possible scenario is when the buoys are fixed to the seafloor and their location is known. Under these circumstances there are two possible ways of extracting the data from the buoys, using the UAV from a remote location to collect the data or with a master base station. The first scenario would be exactly the same as when the buoys are drifting, except that the location is already known and a more precise flight pattern can be planned. If only a master base station were to be used, the LoRa RF configurations of the nodes could be set for long-range transmissions and with high data capture frequency, with a functional behavior similar to that of current buoy implementations. The main advantage of this operation mode is the possibility of transmitting data across several kilometers, and that the base station is only formed by a master node connected to a laptop, allowing the station to be static or mobile.

Although this system completely fulfills the requirements of the SIMMA project, there are several improvements that can be made to create a more robust and functional WSN. In addition to the already

mentioned enhancements made in the post-field analysis section, the inclusion of energy harvesting technologies, as proposed by Zolich et al. [27], is one of the most desirable improvements, as it would allow the buoys to monitor areas for an almost indefinite time. Also, the addition of other types of sensors and backup wireless communications, such as GSM, would grant the system with important ecological data and new ways to find marooned devices. Regarding the use of the UAV, it would be a significant improvement if the aircraft carried additional sensors, such as infrared or multispectral cameras, granting additional information that could be correlated with the data extracted from the buoys. This could be feasible with the same aircraft design, given that the UAV can carry additional payload, other than the master node, yet this was not contemplated within this article. Moreover, further integrating the UAV with the LoRa master node would be of great use, as information provided by the master node could automatically trigger different behaviors on the UAV, such as a change in flight pattern or an emergency return-to-home.

6. Conclusions

In this article, the design and implementation of a UAV assisted long-range buoy based WSN for the monitorization of marine-coastal environments, as well as an improvement to current implementations, has been proven. The development of a LoRa mobile wireless network, from a hardware and firmware perspective, was presented, as well as the implementation of the novel LoRaNET network protocol for LoRa devices. These two developments, applied to the SIMMA end devices, provide an easy-to-use and low power solution, with an extended range of several kilometers, as well as a more cost-effective alternative with fewer infrastructure requirements. Furthermore, it serves as a less invasive method for monitoring natural protected areas and reservoirs.

The integration of the UAV, the Davis monitoring buoys, and the LoRa communications as a single system, adds a needed flexibility to current implementations and the possibility of studying previously unreachable areas, since the buoys can be placed with a small vessel and the UAV can be flown from almost any area, given its great communications reach.

Although this proposal was aimed at marine monitoring, this same system architecture can be used for other types of environments. For instance, the upper part of the buoy, where the slave node's electronics are housed, could be used as a portable meteorological station to temporarily monitor different areas for a given time interval.

Acknowledgments: Trasviña-Moreno would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) of Mexico for providing the scholarship for his Ph.D. In addition, the authors would like to acknowledge the Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada of Mexico for project Sistema Multipropósito para Monitoreo del Medio Ambiente, and the Ministerio de Economía y Competitividad of Spain for projects Memory Lane (ref. TIN2013-45312-R) and Movilidad Verde Inteligente (ref. RTC-2014-2425-4) which this proposal is part of. Furthermore, Trasviña-Moreno would like to thank Agustín Payen Montoya for his advisory and inputs on the UAV.

Author Contributions: Trasviña-Moreno, Blasco, and Marco designed the electronic hardware, firmware, and software of the implementation; Casas coordinated the project from the perspective of the Universidad de Zaragoza; Trasviña-Castro coordinated the team of CICESE and provided the buoy and UAV hardware; Trasviña-Moreno and Blasco wrote the paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Molina-Pico, A.; Cuesta-Frau, D.; Araujo, A.; Alejandre, J.; Rozas, A. Forest Monitoring and Wildland Early Fire Detection by a Hierarchical Wireless Sensor Network. *J. Sens.* **2016**, *2016*, 8325845. [[CrossRef](#)]
2. Aslan, Y.E.; Korpeoglu, I.; Ulusoy, Ö. A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring. *Comput. Environ. Urban Syst.* **2012**, *36*, 614–625. [[CrossRef](#)]
3. Nakagawa, K.; Kobayashi, H.; Sezaki, K. Carrier Pigeon-Like Sensing System: Animal-Computer Interface Design for Opportunistic Data Exchange Interaction for a Wildlife Monitoring Application. In Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference on—AH'14, Kobe, Japan, 7–9 March 2014; pp. 1–2.

4. Dyo, V.; Yousef, K.; Ellwood, S.A.; Macdonald, D.W.; Markham, A.; Trigoni, N.; Wohlers, R.; Mascolo, C.; Pásztor, B.; Scellato, S. WILDSENSING: Design and deployment of a sustainable sensor network for wildlife monitoring. *ACM Trans. Sens. Netw.* **2012**, *8*, 1–33. [[CrossRef](#)]
5. Karim, L.; Anpalagan, A.; Nasser, N.; Almhana, J. Sensor-based M2M Agriculture Monitoring Systems for Developing Countries: State and Challenges. *Netw. Protoc. Algorithms* **2013**, *5*, 68–86. [[CrossRef](#)]
6. Atzberger, C. Clement Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs. *Remote Sens.* **2013**, *5*, 949–981. [[CrossRef](#)]
7. Aliabadi, A.A.; Staebler, R.M.; Sharma, S. Air quality monitoring in communities of the Canadian Arctic during the high shipping season with a focus on local and marine pollution. *Atmos. Chem. Phys.* **2015**, *15*, 2651–2673. [[CrossRef](#)]
8. Cappello, T.; Mauceri, A.; Corsaro, C.; Maisano, M.; Parrino, V.; Paro, G.L.; Messina, G.; Fasulo, S. Impact of environmental pollution on caged mussels *Mytilus galloprovincialis* using NMR-based metabolomics. *Mar. Pollut. Bull.* **2013**, *77*, 132–139. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
9. Gall, S.C.; Thompson, R.C. The impact of debris on marine life. *Mar. Pollut. Bull.* **2015**, *92*, 170–179. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
10. Xu, G.; Shen, W.; Wang, X. Applications of wireless sensor networks in marine environment monitoring: A survey. *Sensors* **2014**, *14*, 16932–16954. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
11. US Department of Commerce. *National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service; N.D.B.C. National Data Buoy Center: Hancock County, MS, USA*, 2016.
12. PhOD—The Global Drifter Program. Available online: <http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/index.php> (accessed on 22 December 2016).
13. Filling The Gap (Infographic)—Drones vs. Other Geospatial Data Sources. Available online: <http://waypoint.sensefly.com/infographic-geospatial-data-collection-drones-satellite-manned/> (accessed on 30 December 2016).
14. Evans, L.; Jones, T.; Pang, K.; Saimin, S.; Goossens, B. Spatial Ecology of Estuarine Crocodile (*Crocodylus porosus*) Nesting in a Fragmented Landscape. *Sensors* **2016**, *16*, 1527. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Hodgson, A.; Kelly, N.; Peel, D. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for surveying Marine Fauna: A dugong case study. *PLoS ONE* **2013**, *8*, e79556. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Bevan, E.; Wibbels, T.; Najera, B.M.Z.; Martinez, M.A.C.; Martinez, L.A.S.; Martinez, F.I.; Cuevas, J.M.; Anderson, T.; Bonka, A.; Hernandez, M.H.; et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring sea turtles in near-shore waters. *Mar. Turt. Newsl.* **2015**, *145*, 19–22.
17. Ortega-Corral, C.; Palafox, L.E.; García-Macías, J.A.; Sánchez-García, J.; Aguilar, L. End-to-end message exchange in a deployable marine environment hierarchical wireless sensor network. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2014**, *10*, 950973. [[CrossRef](#)]
18. Gonçalves, J.A.; Henriques, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2015**, *104*, 101–111. [[CrossRef](#)]
19. Huang, J.L.; Cai, W.Y. UAV low altitude marine monitoring system. In Proceedings of the International Conference on Wireless Communication and Sensor Network (WCSN), Wuhan, China, 13–14 December 2014; pp. 61–64.
20. Leighton, J. *System Design of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Marine Environmental Sensing*; Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA, 2013.
21. Valente, J.; Sanz, D.; Barrientos, A.; del Cerro, J.; Ribeiro, Á.; Rossi, C. An Air-Ground Wireless Sensor Network for Crop Monitoring. *Sensors* **2011**, *11*, 6088–6108. [[CrossRef](#)]
22. Costa, F.G.; Ueyama, J.; Braun, T.; Pessin, G.; Osorio, F.S.; Vargas, P.A. The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor network in agricultural applications. In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich, Germany, 22–27 July 2012; pp. 5045–5048.
23. Kuntze, H.-B.; Frey, C.W.; Tchouchenkov, I.; Staehle, B.; Rome, E.; Pfeiffer, K.; Wenzel, A.; Wollenstein, J. SENEKA—sensor network with mobile robots for disaster management. In Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security (HST), Waltham, MA, USA, 13–15 November 2012; pp. 406–410.
24. Erdelj, M.; Natalizio, E. UAV-assisted disaster management: Applications and open issues. In Proceedings of the 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Koloa, HI, USA, 15–18 February 2016; pp. 1–5.

25. Mekki, S.; Kamoun, M. ANCHORS, an UAV Assisted Integrated Approach to Crisis Management. Available online: https://scholar.google.com/scholar?hl=en&q=ANCHORS%2C+an+UAV+assisted+integrated+approach+to+crisis+management&btnG=&as_sdt=1%2C5&as_sdtp= (accessed on 20 February 2017).
26. Neri, M.; Campi, A.; Suffritti, R.; Grimaccia, F.; Sinogas, P.; Guye, O.; Papin, C.; Michalareas, T.; Gazdag, L.; Rakkolainen, I. SkyMedia—UAV-based capturing of HD/3D content with WSN augmentation for immersive media experiences. In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Barcelona, Spain, 11–15 July 2011; pp. 1–6.
27. Zolich, A.; Alfredsen, J.A.; Johansen, T.A. A communication bridge between underwater sensors and Unmanned Vehicles using a surface Wireless Sensor Network—Design and validation. In Proceedings of the OCEAN 2016—Shanghai, Shanghai, China, 10–13 April 2016; pp. 1–9.
28. Barbatei, R.; Skavhaug, A.; Johansen, T.A. Acquisition and relaying of data from a floating wireless sensor node using an Unmanned Aerial Vehicle. In Proceedings of the 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Denver, CO, USA, 9–12 June 2015; pp. 677–686.
29. Raza, U.; Kulkarni, P.; Sooriyabandara, M. Low Power Wide Area Networks: A Survey. *arXiv* **2016**.
30. Augustin, A.; Yi, J.; Clausen, T.; Townsley, W. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors* **2016**, *16*, 1466.
31. Wendt, T.; Volk, F.; Mackensen, E. A benchmark survey of Long Range (LoRa™) Spread-Spectrum-Communication at 2.45 GHz for safety applications. In Proceedings of the IEEE 16th Annual on Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Cocoa Beach, FL, USA, 13–15 April 2015; pp. 2–5.
32. Trasviña-Moreno, C.A.; Blasco, R.; Casas, R.; Asensio, Á. A Network Performance Analysis of LoRa Modulation for LPWAN Sensor Devices. In *Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence, Proceedings of the 10th International Conference, UCAmI 2016, San Bartolomé de Tirajana, Gran Canaria, Spain, 29 November–2 December 2016, Part II*; García, C.R., Caballero-Gil, P., Burmester, M., Quesada-Arencibia, A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2016; pp. 174–181.
33. Aref, M.; Sikora, A. Free space range measurements with Semtech LoRa™ technology. In Proceedings of the 2014 2nd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS-SWS, Offenburg, Germany, 11–12 September 2014; pp. 19–23.
34. Semtech LoRa Modulation Basics. Available online: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf> (accessed on 22 February 2017).
35. Bruno, M.; Mariscal, L.A. Wireless Communications for marine sensor networks. *Instrum. Viewp.* **2011**, *11*, 44.
36. Xu, G.; Shen, W.; Wang, X. Marine environment monitoring using Wireless Sensor Networks: A systematic review. In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, San Diego, CA, USA, 5–8 October 2014; pp. 13–18.
37. LoRa Technology—LoRaWAN. Available online: <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology> (accessed on 31 December 2016).
38. PIC24FJ128GC006—16-Bit—Microcontrollers and Digital Signal Controllers. Available online: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC24FJ128GC006> (accessed on 31 December 2016).
39. RN2483—Wireless Modules. Available online: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483> (accessed on 29 December 2016).
40. SIM928A—GSM/GPRS+GNSS Module. Available online: <http://simcomm2m.com/En/module/detail.aspx?id=77> (accessed on 30 December 2016).
41. BME280—Integrated Environmental Unit. Available online: https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme280 (accessed on 30 December 2016).
42. Anemometer Wind Speed Sensor w/ Analog Voltage Output ID: 1733. Available online: <https://www.adafruit.com/product/1733> (accessed on 30 December 2016).
43. Waterproof Temperature Sensor—DS18B20. Available online: <https://www.cooking-hacks.com/temperature-sensor-waterproof-ds18b20> (accessed on 30 December 2016).
44. Semtech LoRa Modem Design Guide. Available online: https://www.semtech.com/images/datasheet/LoraDesignGuide_STD.pdf (accessed on 22 February 2017).

45. SX1276 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver | Semtech. Available online: <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1276/> (accessed on 26 May 2016).
46. BeagleBone Black. Available online: <https://beagleboard.org/black> (accessed on 30 December 2016).
47. RN4020—Bluetooth Module. Available online: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN4020> (accessed on 31 December 2016).
48. ETRX3 ZigBee Radio Modules from Telegesis. Available online: <http://www.telegesis.com/products/etrx3-based-products/etrx3-zigbee-radio-module/> (accessed on 31 December 2016).
49. Semtech SX1276. Available online: <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1276/> (accessed on 15 June 2016).
50. OSGi™ Alliance—The Dynamic Module System for JAVA. Available online: <https://www.osgi.org/> (accessed on 31 December 2016).
51. Panda II Autopilot System. Available online: http://www.feiyu-tech.com/index.php/Product/detail/pr_id/48.html (accessed on 23 February 2017).
52. FY-605 Data Radio. Available online: http://www.feiyu-tech.com/index.php/Product/detail/pr_id/54.html (accessed on 23 February 2017).
53. Angular Framework. Available online: <https://angular.io/> (accessed on 30 December 2016).
54. Petäjäjärvi, J.; Mikhaylov, K.; Roivainen, A.; Hänninen, T.; Pettissalo, M. On the Coverage of LPWANs: Range Evaluation and Channel Attenuation Model for LoRa Technology. In Proceedings of the 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), Copenhagen, Denmark, 2–4 December 2015; pp. 55–59.
55. Extreme Range Links: LoRa 868/900MHz SX1272 Module for Arduino, Waspote and Raspberry Pi. Available online: <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/extreme-range-lora-sx1272-module-shield-arduino-raspberry-pi-intel-galileo/> (accessed on 29 November 2016).



© 2017 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

EVALUATION OF LORA MODULATION IN THE 433 MHZ FREQUENCY BAND FOR OUTDOOR MONITORING

Carlos A. Trasviña-Moreno, Rubén Blasco Marín, Roberto Casas Nebra, Álvaro Marco Marco

University of Zaragoza, Aragon Institute of Engineering Research, HOWLab, PhD Student, +34876555464, Zaragoza, 50018, Spain. *trasvina@unizar.es

Received: 3/May/2019-- Reviewing: 10/May/2019-- Accepted: 6/Nov/2019--DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8823>

TO CITE THIS ARTICLE:

TRASVIÑA-MORENO, Carlos Andres, BLASCO, Ruben, CASAS-NEBRA, Roberto et al. EVALUATION OF THE LORA MODULATION IN THE 433 MHZ BAND FOR OUTDOOR MONITORING. DYNA New Technologies, January-December 2019, vol. 6, no. 1, p.[11 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT8823>

ABSTRACT:

In recent years, Wireless Sensor Networks (WSN) have become increasingly more important for outdoor monitoring. The need to analyse relevant data in real-time in rural environments, such as natural reserves, agricultural field, etc. have driven the development of new communication technologies. Several protocols have been created to fulfil the requirements of many WSN scenarios, yet outdoor monitoring presents' unique challenges which have not been fully accomplished, specifically covering areas of great length with a low power consumption. The newly arisen Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies aim to fill this gap, with long range transmitting capabilities. One such technology is the Long Range (LoRa) modulation, which operates in sub-GHz frequencies. To provide greater insight into this technology, this paper makes an evaluation of LoRa modulation using the 433 MHz frequency band. A thorough theoretical and practical analysis in energy, data throughput and range characteristics is done, while comparing LoRa with other LPWAN technologies. The experimental results demonstrate the full capabilities of this modulation, as well as the potential inclusion in outdoor monitoring networks.

Keywords: LoRa, WSN, LPWAN, Internet of Things.

1.- INTRODUCTION

Outdoor environments present various challenges for wireless sensing networks (WSN) and electronic developments in general. Depending on the scenario, it is common to find high humidity levels, varying temperatures, corrosive substances, animal predation or vandalism, amongst other factors. Additionally, from a wireless communication perspective, a common struggle is the inherent interference in the propagation environment, such as signal dampening produced by vegetation or the orography, and radio interference produced by other communication devices. Given the remote nature of the environment, the monitoring devices should be operationally autonomous with a long lifespan, requiring the least amount of maintenance and human interaction, and, preferably, secure data links, amongst other requirements [1]

There are various types of outdoor monitoring scenarios, such as wildlife preservation, natural disaster prevention and natural reservoir monitoring, amongst others. Additionally, primary industrial environments such as agriculture, mining and oil extraction, can also be considered within this classification. In monitoring applications such as these, several Internet of Things (IoT) based wireless solutions can be found in the literature. It is common to find monitoring devices with wireless communication such as ZigBee [3], GPRS [4], WiFi [4] or proprietary protocols.

Although the previously mentioned outdoor scenarios are very heterogeneous, they all share a common characteristic, large widespread areas to be monitored, which in some cases may stretch across several square kilometres. With conventional WSN standards or the earlier mentioned IoT protocols, it would require either the segmentation of the network or an elevated number of nodes to cover such an area, as their transmission range averages a few hundred meters at most [4][4].

To cope with this unique challenge, some implementations have been done using Low Power WAN (LPWAN) technologies, commonly used in IoT. An example of such developments is the case of WellAware, which uses Ingenu wireless nodes to monitor its oil fields in USA [6][7]. Another case is the proposal of Paller G. y Elo G, which uses a GSM/Sigfox hybrid camera sensor to observe rodent activity in agriculture fields. Llaría et Al. [8] propose a monitoring

platform for mountain farming, which uses GPS and Sigfox transceivers to locate cows in the mountain sides in France and Spain.

An interesting LPWAN technology, which has yet to be mentioned, is the LoRa (Long Range) modulation [10][11] from Semtech. This technology presents itself as a low power type of communication which can transmit below the noise floor, with a range of several kilometres. This is accomplished thanks to its Forward Error Correction (FEC) and the processing gain from its spread spectrum [12]. Additionally, it has a wide operating frequency range and presents high immunity to interference due to its unique chirp spread spectrum approach, orthogonal spreading factors and error correction scheme [11]. The use of the LoRa modulation has been applied to various fields, such as smart metering, health and wellbeing [13], and agriculture [14]. In these implementations, as well as others, it is possible to find a common denominator for this technology, the use of the 868/915 MHz operating frequency, which is a free ISM band. Studies or applications using other frequency bands such as de 433 MHz are scarce [15]. One of the main advantages of using a lower operating frequency is its higher penetration depth in line-of-sight propagation applications. As mentioned previously, for wireless monitoring applications this is characteristic is of great interest, as it reduces the interference of signal dampeners and effectively increases the possible transmission range.

The aim of this article is to evaluate the LoRa wireless modulation in 433 MHz operating frequency, from an energy and transmission range perspective, offering the reader a greater understanding of the various RF configurations available for this technology and their implication in the design of a LoRa network for outdoors. In the following sections of this paper a description of the implemented node architectures is detailed. Moreover, a description and results of the practical experimentation to obtain the node's energy consumption, transmission range and most efficient configurations is explained. To finalize, a discussion of the obtained results, as well as some final conclusions are presented.

2.- PROPOSED ARCHITECTURE

For the purpose of this evaluation, two LoRa node prototypes were designed, programmed and implemented by the authors. The first prototype was based on the RN2483 architecture [17], which is capable of transmitting data in a wide range of frequencies with the LoRa modulation, ranging from 137 MHz to 1020 MHz. The RN2483 was programmed with a proprietary firmware without the implementation of the LoRaWAN network layer protocol, as it does not allow the modification of all configuration parameters in the 433 MHz frequency band [18]. Furthermore, the LoRaWAN protocol has a higher energy consumption than that of the raw modulation which alters the energy usage of data transmissions and does not allow for a clear understanding of the implementation of LoRa directly in any type of application scenario. For reference purposes, this device will be named here on after as prototype A.

The second prototype is a more complex implementation, with a main processing unit based on 16 bit PIC24FJ128GC006 microcontroller [19], which manages all the peripherals and communications. Given its architecture, it offers several low power configurations that can be used to increase the life span of the device. Additionally, this device also uses a RN2483 transceiver [17], an 8 Mbit flash memory [20] and a SIM928A GPS and GSM integrated circuit [21]. The RN2483 uses the same firmware as the previous prototype. This prototype will be referenced as prototype B (Figure 1).

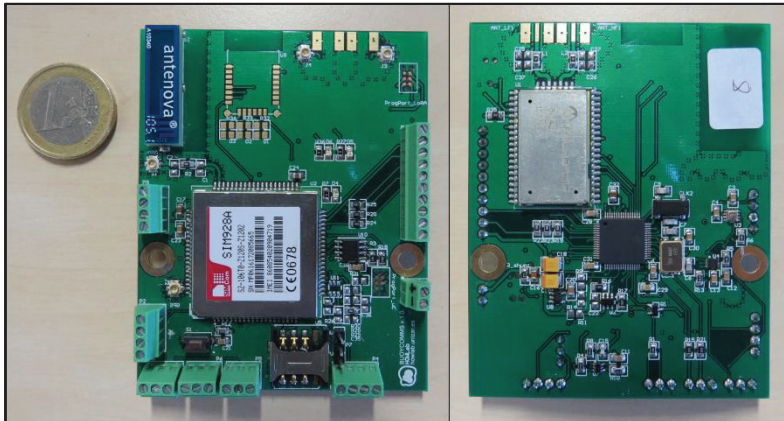


Figure 1 – PCB design for the LoRa prototype B.

As seen in Figure 1, this prototype has several unsoldered devices as it is also meant to be used for other applications beyond this study. The absence of these devices does not affect the in any way the evaluations to which the prototype will be submitted to.

Both prototypes were powered by a 3.3 V source and coupled with a passive 50-ohm omnidirectional antenna transmitting at a static value of 13 dBm. Their transmission packets are composed solely by a preamble of 12 symbols/chirp and the payload. To configure these devices a serial port connection can be established with a PC, from which a series of pre-established AT commands can be sent.

3.- TESTS AND RESULTS

This section will be divided into two subsections: 1) analysis of the energy consumption during transmissions and 2) long range transmission field tests. The main objective of these tests is to find the best optimal configuration taking in consideration its range and energy consumption. The premise behind this is that by finding the adequate balance between these two characteristics, it will be possible to design a long range and low power network with an optimal performance for monitoring outdoor environments with the least amount of nodes possible. It is worth noting that, in a previous study, a comparison of the 868/433 MHz frequency band with LoRa was done, where a difference of 12 dBm in RSSI favourable to the 433 MHz band was found [21].

3.1.- ENERGY CONSUMPTION TRIALS

The main configuration parameters of the LoRa modulation, which directly impact its energy consumptions, are: spreading factor (SF), bandwidth (BW) y coding rate (CR). These allow the user to modify the required energy for the link budget, the use of the frequency spectrum, the immunity to interference and the nominal data transmission rate. To better understand the impact of these parameters, several trials were done using the prototype A. The first analysis was of a theoretical nature, where two formulas, extracted from various LoRa technical documents [12][23], were utilized to calculate some of the theoretical parameters needed.

$$T_{packet} = (n_{preamble} + 4.25) \left(\frac{2^{SF}}{BW} \right) + \left(8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right) (CR + 4), 0 \right) \right) \left(\frac{2^{SF}}{BW} \right) \quad (1)$$

$$BR = SF \left(\frac{BW}{2^{SF}} \right) CR \quad (2)$$

Formula 1 is used to calculate the transmission time of each packet (T_{packet}), or time on air, where $n_{preamble}$ represents the number of symbols programmed in the preamble, H is equal to 1 if the explicit headers are enabled and 0 if disabled, DE is equal to 1 if the data optimization is enabled or 0 if disabled, and PL represents the number of payload bytes. This

formula is a specific variation relevant to the packet configuration mentioned earlier. With the time on air and transmission power it is possible to calculate the energy of each transmission.

Formula 2 is used to extract the theoretical bitrate (BR) and, lastly, with the LoRa design tools [23] it is possible to extract the receiver sensitivity.

With both these formulas and the theoretical parameters, calculations were made for various SF, BW and CR configurations, with a fixed payload of 6 bytes. For each of these trials the programmed preamble was of 12 symbols, the default settings suggested by the manufacturer. The variation in the preamble does directly influence in the amount of energy consumed, the greater the number of symbols in the preamble, the greater the energy consumed and vice versa. This behaviour is due to the amount of synchronization time that the receiver requires to receive a given message. Having extracted the theoretical data, the next step was to measure the amount of energy consumed in a single transmission with the previously defined payload. Additionally, the current consumption per transmission period was also measured, to understand how demanding the requirements are at this stage. These measurements were done using a shunt resistance on the high side of the load. Current was then measured and logged with the NI USB-6009 and a custom LABView interface. With the obtained data, it was possible to calculate that the transmitter consumes in average 30 to 32 mA at 3.0 V.

For the first trial, the prototype A was programmed to periodically send transmissions with spreading factors of 4096 (SF12), 1024 (SF10) and 256 (SF8) chips/symbol, and various bandwidths, maintaining the coding rate at its minimum value of 4/5 (CR1). Current was then measured and converted to energy accordingly. The SF and BW configurations were selected with the idea of maintaining a high receiver sensitivity and acceptable bitrate. To calculate the average energy consumed in each configuration, the voltage, current and time was measured for each set of transmissions. These results are shown in Table 1, as well as the calculated theoretical values.

Table 1 – Theoretical and practical energy comparison for the LoRa transmissions.

SF	BW (kHz)	Tx Energy (mJ)	Theoretical Tx Energy (mJ)	Theoretical receiver sensitivity (dBm)	Theoretical bitrate (bps)
12	500	22.11	23.89	-132	1171.88
12	250	40.81	47.78	-135	585.94
12	125	101.94	95.56	-138	292.97
12	62,5	202.72	191.13	-141	146.48
12	31,2	404.83	382.26	-144.1	73.24
12	7,8	1622.04	1531.47	-150.1	18.28
10	500	6.421	5.97	-127	3906.25
10	250	12.70	11.95	-130	1953.13
10	125	25.34	23.89	-133	976.56
10	62,5	50.68	47.78	-136	488.28
10	31,2	100.81	95.56	-139.4	244.14
10	7,8	395.63	382.87	-145.6	60.94
8	500	1.50	1.49	-121	125000
8	250	3.07	2.99	-124	6250
8	125	3.09	5.97	-127	3125
8	62,5	12.89	11.95	-130	1562.5
8	31,2	25.44	23.89	-133.8	781.25
8	7,8	120.33	95.72	-140.3	195

In Table 1 it is possible to notice that at lower bitrates the utilized energy is reduced, a specific behaviour to this modulation. In LoRa, the bandwidth influences directly on the bitrate with a conversion rate of 1:1 with the chips per second, or chirp rate (e.g. 500 kHz = 500 kcps). This means that by increasing the bandwidth, which in turn provides a higher bitrate, the data is modulated and transmitted in a faster manner. Given that the energy is directly proportionate to time and amplitude, or signal power, it can be said that the bandwidth/bitrate is inversely proportional to that of the transmission energy.

With the obtained data from Table 1 it is possible to select a configuration which best adapts to the necessities of a various projects. For the specific case of WSN in outdoor environments, the main focus is usually to transmit data across great distances, for which it is desirable to have a high receiver sensitivity. Nonetheless, to achieve this feat there are certain drawbacks, as increasing the receiver sensitivity also increases the required energy, effectively reducing the transmission rate which might not be a desirable effect in some cases. In scenarios where a high bitrate is required, it is possible to select a configuration with less receiver sensitivity, limiting the maximum transmission range.

From the previous table, two RF configurations were selected for the following experimentations: 1) SF10 y BW de 125 kHz, which is considered the most balanced regarding energy, receiver sensitivity and bitrate; and 2) SF12 y BW de 125 kHz, which has an increased receiver sensitivity, at the expense of a reduced bitrate and higher energy consumption. Having selected this two scenarios, the next trial was to see the impact of increasing the number of bytes transmitted. Given that the transmission packets, as stated before, have a 12 symbol programmed preamble, there is a minimum amount of static energy that will be required for any LoRa transmission. To calculate the effective energy used to transmit the payload, the energy is divided amongst the number of bytes sent and the energy used by the preamble bytes is subtracted, as show in Table 2.

Table 2 – Energy consumed by the LoRa transmissions with different payloads (BW = 125 kHz).

SF	Payload bytes	Effective energy (%)	Tx energy (mJ)	Theoretical Tx energy (mJ)
12	6	75.00	99.20	95.56
12	10	83.33	101.94	95.56
12	20	90.91	130.32	133.41
12	40	95.24	198.18	190.18
12	100	98.04	391.67	379.42
10	6	75.00	25.341	23.89
10	10	83.33	30.62	28.62
10	20	90.91	39.19	38.08
10	40	95.24	54.91	57.01
10	100	98.04	102.54	113.78

As expected, increasing the amount of data transmitted increases the amount of energy consumed. Yet, for each configuration the impact of the preamble's energy is reduced at higher payload transmissions. It is worth noting that this feature could be reduced to the minimum 6 symbol value, which would further reduce the transmission energy.

The next test consisted in varying the CR which, as the theory suggests, incurs in an additional overhead in transmissions. This implies that it will necessarily increase the energy consumed. With the same two previously selected scenarios, and with a six-byte payload, the energy was extracted for transmissions with coding rates of 4/5 (CR1), 4/6 (CR2), 4/7 (CR3) and 4/8 (CR4), comparing them with the theoretical calculations (Table 3).

Table 3 - LoRa transmissions with CR variations ($BW = 125 \text{ kHz}$).

SF	CR	Theoretical bitrate (bps)	Tx energy (mJ)	Theoretical Tx energy (mJ)
12	1	292.97	101.94	95.56
12	2	244.14	112.14	99.35
12	3	209.26	118.78	103.13
12	4	183.11	125.54	106.92
10	1	976.56	25.34	23.89
10	2	813.80	27.95	24.84
10	3	697.54	29.50	25.78
10	4	610.35	31.23	26.73

As shown, there is a slight increase in energy consumption while increasing the CR, yet this percentage becomes almost negligible the more the SF is reduced. Increasing the CR has the benefit of giving additional robustness to the signal transmission at the cost of reducing the bitrate, as the redundancy in each transmission is increased.

3.2.- TRANSMISSION TRIALS

With the results obtained from other studies [21][24], it is expected that the modules will be able to transmit LoRa messages across several kilometres. To prove this premise, two practical experiments were proposed: the first in an urban setting and the second in an open space environment.

For these trials the SF12 and BW 125 KHz RF configuration was selected, given that it has a high receiver sensitivity and moderate energy consumption and bitrate in comparison to other technologies. As the amount of interference that could be found in each scenarios is unknown, the CR 4/8 parameter was selected to ensure a stable communication link. Each packet transmitted was sent with a sequential and incremental number of bytes, which allow to easily verify data integrity and possible unwanted received packets.

3.2.1.- Urban transmission trials

This first experiment was realized in the city of La Paz (Mexico), which represents a densely populated area with approximately the same height above sea level across the city and the majority of buildings of single or two stories only. The transmitter was placed on the rooftop of a single story building, whilst the receiver (prototype B) was moved along various locations at approximately 2 meters of height. Given the location of both nodes, the transmission path had several signal dampeners in its way, such as other buildings, trees, electrical wiring and billboards. In these trials the RSSI and percentage of received packets was measured, as well as the GPS coordinates of each receiver location (Figure 2).



Reception points	Distance (km)	RSSI (dBm)	Packets received (%)
1	1.05	-124	100
2	1.11	-123	100
3	1.10	-122	100
4	1.44	-124	100
5	1.01	-124	100
6	1.87	-123	40
7	1.06	-124	100
8	1.43	-123	100
9	2.20	-124	100
10	2.31	-124	50

Figure 2 – Geographical location of the various urban transmission trials (image extracted from Google Earth) and the obtained data. The letter B indicates the location of the transmitter node (24.145178, -110.305940).

The tests location shown in Figure 2 represent the maximum distance achieved in each direction from the base station.

3.2.2.- Open space transmission trials

These trials were realized in the bay of Cullera, in Valencia (Spain), as this specific location offers the possibility of evaluating the LoRa modulation in a wide open space with a good line of sight in multiple sites. Although this could also be considered an urban environment, in this location there are less signal dampeners and a greater line of sight than in the previous trials.

The base station was located approximately 24 meters above sea level, while the receiving node (prototype B) was placed in 10 different locations, where the reception of 30 consecutive packets was sought out. Additionally, the average RSSI and the percentage of packets received was measured, as well as the GPS coordinates of each test point was captured (Figure 3).



Reception points	Distance (km)	RSSI (dBm)	Height (m)	Packets received (%)
1	12.42	-122	1	100
2	13.78	-123	2	100
3	16.96	-123	1	100
4	19.20	-121	1	100
5	20.78	-122	1	100
6	22.38	-121	8	100
7	28.58	-119	6	100
8	30.24	-129	7	100
9	28.97	-118	115	100
10	48,23	-116	93	100

Figure 3 – Geographic location of the different trials (image extracted from Google Earth) and the data extracted. The letter B corresponds to the transmitter node (39.164631, -0.241767).

In Figure 3 it is possible to appreciate the elevation of the node at each location, which was extracted afterwards using an online geographical profiler [25]. The height at each point as at least 1 meter in altitude as a tripod of that height was used to maintain the receiver in a stable position.

4.- DISCUSSION

The results shown in Tables 1, 2 and 3 clearly depict the energy requirements for different LoRa transmissions. In Table 1 it is possible to see the flexibility that the LoRa modulation provides with its configuration parameters and wide frequency range, allowing the technology to adapt to various applications. It is worth noting that even lower spreading factors can be configured with the device, which would grant higher data rate and lower energy consumption, yet they were not explored in this proposal due to the transmission range limitations.

With the obtained data in Table 3, it is possible to appreciate that the reduction in bitrate by increasing the CR value is equivalent to fixed percentages. E.g. if the SF12 values are compared, there is a 37.5% reduction in data rate from the CR1 to the CR4, which is the same percentage for SF10. This is applicable to other BW, thus the data rate for other configurations can easily be calculated to select the most suitable for a given application.

With the transmission trials done, it is possible to understand the capabilities of LoRa transmissions in highly obstructed and clear-path scenarios. In the results shown in Figure 2, it can be seen that in urban settings results may vary widely depending on the amount of signal obstructions found. In some directions only 1 kilometre was achieved, whilst in other more than double the transmission distance. Additionally, the maximum achieved RSSI is approximately 8 dB lower than the theoretically calculated.

In the open space trials done in Cullera (Figure 3), the average RSSI was significantly reduced in trials 1 to 8 due to the non-compliance of at least the first Fresnel Zone, given that the receiver was practically at sea level.

Additionally, it is worth noting that in these initial trials the signal travelled across some buildings and other signal dampeners, which consequently added losses to the total link budget. With these type of conditions it was not possible to achieve a greater transmission range, nonetheless in trials 9 and 10 (Figure 3) a significant improvement can be seen

in the RSSI with a greater distance between nodes. This is mainly due to the influence of the height above sea level in these transmissions, which can be clearly seen comparing trials 8 and 9 where there is a -11 dBm difference and 100 meters in height variation amongst each other. In trial 10 it was proven that it is possible to transmit at almost 50 km with an average RSSI of -116.73 dBm con with proposed LoRa configuration. This value is far below the -138 dBm theoretical receiver sensitivity of this parameter setting (Table 1)

In trials 9 and 10 a reception point with higher altitude were sought out, and even though they are further in main-land, this additional height increased the RSSI significantly. This difference is very noticeable in trials 8 and 9, as the reception points are almost at the same distance from the base node yet there is a variation of approximately -10 dBm. The data displayed in trial 10, demonstrates that transmissions across almost 50 km with an RSSI of -116.73 dBm are possible with the proposed LoRa configuration. Theoretically, using these same settings it is possible to have a maximum receiver sensitivity of -138 dBm (Table IV). From this it can be inferred that it could be possible to transmit even at greater distances between the transmitter and receiver, with the radio horizon limitations of line-of-sight propagations. Further trials were sought out in the Cullera bay, yet it was not possible to find other accessible reception points with line of sight and increased distance. From this it can be inferred that it could be possible to transmit even at greater distances between the transmitter and receiver, although this could not be tested given the lack of reception points with good line-of-sight.

Considering the results obtained in these open space trials, it is possible to theorize that the same transmission range can be achievable with other LoRa RF configurations. With a setup of SF10 and BW 125 kHz a -133 dBm receiver sensitivity is attainable (Table 1), which is a superior RSSI value required for the transmission in trial 10 (Figure 3). Such a wide range provides the possibility of covering an area of several square kilometres with a single star topology and a reduced number of nodes.

5.- CONCLUSIONS

The results shown in this paper provides the reader with the tools necessary for a proper network design of a LoRa LP-WAN application, offering insight in the different modulation's RF configurations, their impact and how to choose the proper settings for a specific implementation using the 433 MHz operating frequency. This allows the LoRa network designer to fine-tune the design from a PHY layer perspective before the implementation of a MAC layer protocol.

In the field trials, two distinct scenarios were tested, representing opposite application settings. In conjunction with the configuration trials, it is possible to better understand the range capabilities of this technology in two distinct scenarios, as from a theoretical standpoint it is not simple to calculate this parameter in such wide spaces with a clear knowledge of the deployment environment.

The possibility of implementing a wireless technology, such as LoRa, within a lower frequency spectrum offers several benefits for outdoor applications. With a single transmitter, it is possible to cover a radius of several kilometres in both open and cluttered spaces, thus enabling a single low power monitoring network. Given its high signal penetration frequency and low power characteristics, the LoRa modulation is not restricted to outdoor monitoring, it may also may prove useful in smart buildings and industrial environments. This technology combined with an IP based protocol, such as Ethernet or WiFi, can enable real-time remote monitoring of areas with several square kilometres. Given its operating frequency, the LoRa modulation can easily co-exist with 802.11 wireless based protocols without interfering with its own transmissions.

REFERENCES

- [1] A. Jangra, Swati, Richa, and Priyanka, "Wireless Sensor Network (WSN): Architectural Design issues and Challenges," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 9, p. 3089–3094, 2010.
- [2] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [3] S. Qin, Y. Hu, Q. Jin, and D. Yuan, "Design of Wireless Sensor Networks on Offshore Environment Monitor," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering*, 2015, vol. 3, no. 12, p. 1–7. DOI:

- <https://doi.org/10.2991/ic3me-15.2015.160>
- [4] P. Barattini, E. Garcés, M. Bonasso, S. Mier, P. Philimis, A. Giusti, K. Thomas, A. Varriale, S. D. Auria, J. Fitzgerald, R. O. Kennedy, J. Ducree, and F. Regan, "MARIABOX an autonomous monitoring device for marine pollution : from the laboratory to a product : design challenges and real world trade-off," p. 1–4.
- [5] F.-J. Wu, T. Luo, and J. C. J. Liang, "A crowdsourced WiFi sensing system with an endorsement network in smart cities," in *2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, 2015, no. April, p. 1–2. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISSNIP.2015.7106968>
- [6] "Ingenu and WellAware Announce Machine Network Expansion." [Online]. Available: <http://www.ingenu.com/2016/01/ingenu-and-wellaware-announce-machine-network-expansion/>. [Accessed: 23-Nov-2018].
- [7] Ingenu, "An Educational Guide : How RPMA Works - White Paper," p. 1–5, 2015.
- [8] G. Paller and G. Élő, "Power consumption considerations of an agricultural camera sensor with image processing capability," in *2nd International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumental Advances (SEIA' 2016)*, 22-23 September 2016, Barcelona, Spain, 2016, p. 22–23.
- [9] A. Llaría, G. Terrasson, H. Arregui, and A. Hacala, "Geolocation and monitoring platform for extensive farming in mountain pastures," *2015 IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, p. 2420–2425, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125454>
- [10] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: A Survey," p. 1–15, 2016.
- [11] Semtech, "LoRa Modulation Basics - Application note," no. May, p. 1–26, 2015.
- [12] Semtech, "LoRa Modem Designer's Guide," no. July, p. 1–9, 2013.
- [13] L. Koschel, K. Mahler, R. Felbecker, and M. Frey, "RF-MIMO for smart metering communication under harsh conditions," in *2014 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWISE)*, 2014, p. 55–60. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICWISE.2014.7042661>
- [14] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, M. Hamalainen, and J. Linatti, "Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring," *Int. Symp. Med. Inf. Commun. Technol. ISMICT*, vol. 2016–June, no. November, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISMICT.2016.7498898>
- [15] D. Sartori and D. Brunelli, "A smart sensor for precision agriculture powered by microbial fuel cells," in *2016 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2016, p. 1–6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SAS.2016.7479815>
- [16] C. Trasviña-Moreno, R. Blasco, Á. Marco, R. Casas, and A. Trasviña-Castro, "Unmanned Aerial Vehicle Based Wireless Sensor Network for Marine-Coastal Environment Monitoring," *Sensors*, vol. 17, no. 3, p. 460, Feb. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s17030460>
- [17] "RN2483 - Wireless Modules." [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483>. [Accessed: 23-Nov-2018].
- [18] LoRa Alliance, "LoRaWAN 1.0.2 Regional Parameters," no. Feb, pp. 1–55, 2017.
- [19] "PIC24FJ128GC006 - 16-Bit - Microcontrollers and Digital Signal Controllers." [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC24FJ128GC006>. [Accessed: 23-Nov-2018].
- [20] "Microchip - SST25VF080B SPI serial flash memory." [Online]. Available: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/SST25VF080B>. [Accessed: 23-Nov-2018].
- [21] "SIMCom - SIM928A." [Online]. Available: <http://simcomm2m.com/En/module/detail.aspx?id=77>. [Accessed: 23-Nov-2018].
- [22] C. A. Trasviña-Moreno, R. Blasco, R. Casas, and Á. Asensio, "A Network Performance Analysis of LoRa Modulation for LPWAN Sensor Devices," *Springer International Publishing*, 2016, p. 174–181. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-48799-1_21
- [23] Semtech, "LoRa Modem Low Energy Consumption Design," no. July, p. 1–11, 2013.
- [24] "Extreme Range Links: LoRa 868 / 900MHz SX1272 Module for Arduino, Waspmote and Raspberry Pi." [Online]. Available: <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/extreme-range-lora-sx1272-module-shield-arduino-raspberry-pi-intel-galileo/>. [Accessed: 23-Nov-2018].
- [25] "HeyWhatsThat Path Profiler." [Online]. Available: <http://www.heywhats-that.com/profiler.html>. [Accessed: 23-Nov-2018].
- [26] H. D. Hristov. *Fresnel zones in wireless links, zone plate lenses, and antennas*. Artech House antennas and propagation library, Artech House, 2000, p. 1-323

ACKNOWLEDGMENTS

Trasviña-Moreno would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) of México for providing the scholarship for his Ph. D. In addition, the authors would like to acknowledge the Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada (CICESE) of México for project "Sistema Multipropósito para Monitoreo del Medio Ambiente", and the Ministerio de Economía y Competitividad of Spain for projects "Memory Lane" (ref. TIN2013-45312-R) and "Movilidad Verde Inteligente" (ref. RTC-2014-2425-592 4) which this proposal is part of.