



***DIFU*_{100ci@}, Revista de Difusión Científica**

Ingeniería y Tecnologías

Vol: 15

Num: 1

Publicación: Enero - Abril 2021

ISSN: 2007-3585

Reservas de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2015-060212215100-203



Una publicación de la Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”

Directorio

Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”

Dr. Antonio Guzmán Fernández, *Rector*

Dr. Rubén de Jesús Ibarra Reyes, *Secretario General*

Dr. Luis Alejandro Aguilera Galavíz, *Secretario Académico*

Dr. Agustín Serna Aguilera, *Secretario Administrativo*

Dr. Manuel Reta Hernández, *Coord. Investigación y Posgrado*

Dra. Georgia Aralu González Pérez, *Coord. Depto. Editorial*

Editor en Jefe

Víktor Iván Rodríguez Abdalá, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Editores Asociados

Manuel Hernández Calviño, *Universidad de La Habana, (Cuba)*

José Ricardo Gómez Rodríguez, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Grupo Revisor

Jorge Flores Troncoso, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Remberto Sandoval Aréchiga, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Salvador Ibarra Delgado, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Juvenal Villanueva Maldonado, *CONACyT-UAZ, (México)*

Jorge Simón Rodríguez, *CONACyT-UAZ, (México)*

Rodrigo Daniel Méndez Ramírez, *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, (México)*

Leonardo Acho Zuppa, *Universidad Politécnica de Catalunya, (España)*

Miguel Andrés, *Universidad de Valencia, (España)*

José Ángel González Fraga, *Universidad Autónoma de Baja California, (México)*

Ramón Parra Michel, *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, (México)*

Leonel Soriano Equigua, *Universidad de Colima, (México)*

José Luis Álvarez Flores, *Universidad de Colima, (México)*

Fermín Marcelo Rubén Maciel Barbosa, *Universidad de Colima, (México)*

Francisco Rubén Castillo Soria, *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (México)*

Cristian Eduardo Boyain y Goytia Luna, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Juan Pablo Morales Álvarez, *Instituto Tecnológico de La Paz, (México)*

Daniel Armando Hirles Valles, *Instituto Tecnológico de La Paz, (México)*

Jaime Sánchez García, *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, (México)*

Salvador Villarreal Reyes, *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, (México)*

Ernesto García Domínguez, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Rafael Villela Varela, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Jorge de la Torre y Ramos, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Manuel Reta Hernández, *Universidad Autónoma de Zacatecas, (México)*

Derechos reservados

Editorial

Universidad Autónoma de Zacatecas
“Francisco García Salinas”

Diseño de revista

Víktor Iván Rodríguez Abdalá
José Ricardo Gómez Rodríguez

Derechos Reservados

Universidad Autónoma de Zacatecas
“Francisco García Salinas”

ISSN 2007-3585

DIFU100ci@ (léase difuciencia) es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Autónoma de Zacatecas, “Francisco García Salinas”, a través de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Jardín Juárez No. 147, Colonia Centro, Zacatecas, Zacatecas, C.P. 98000. Tel. (01 492) 925 6690.

Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-060212215100-203, ISSN: 2007-3585, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas” a través de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica.

<http://www.uaz.edu.mx>

<http://difu100cia.uaz.edu.mx>

difu100cia@uaz.edu.mx

Carta del editor

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos abarcan una gran cantidad de áreas de investigación, que van desde el desarrollo de tecnología para los dispositivos móviles hasta las torres de comunicación para mejorar la cobertura del sistema de comunicación, pasando por el canal inalámbrico el cual es un recurso limitado.

Debido a las características mismas de las comunicaciones inalámbricas, en años recientes se ha fomentado la investigación en torno a la optimización de recursos, ya sea en el consumo de potencia de los dispositivos móviles, la cantidad de usuarios y ancho de banda que puede obtenerse bajo ciertos canales inalámbricos, como la cobertura y costos para el despliegue de la red de telecomunicaciones para una tecnología dada.

Actualmente, ya no solo se busca que los dispositivos móviles dispongan de un gran ancho de banda y alta velocidades para la transmisión de datos, como lo es en la quinta generación (5G) de celulares, sino también se busca que sean de tamaño reducido, de bajo consumo de potencia y de ancho de banda angosta como los nodos de las redes de Internet de las Cosas.

Ciertamente existe una gran cantidad de limitantes en los sistemas de comunicaciones inalámbricas, pero estas se traducen en áreas de oportunidad para la comunidad científica tanto a nivel teórico-matemático como de implementación de ingeniería.



Víctor Iván Rodríguez Abdalá
Editor en Jefe

Índice general



Directorio	I
Derechos reservados	II
Carta del editor	III
1. Análisis de Rendimiento de Algoritmos de Selección de Usuarios y Ecuación de Baja Complejidad en Sistemas MIMO con Canales Interferentes	1
2. Estudio descriptivo de LoRaWAN y aplicaciones específicas	8

Performance Analysis of Low Complexity User Selection and Equalization Algorithms in MIMO Interfering Channels

Análisis de Rendimiento de Algoritmos de Selección de Usuarios y Ecuación de Baja Complejidad en Sistemas MIMO con Canales Interferentes

Fermín M. R. Maciel-Barboza¹, Leonel Soriano-Equigua^{*1}, Victor H. Castillo-Topete¹, José L. Álvarez-Flores¹, Jesus U. Mora-Quñones¹, and Francisco R. Castillo-Soria²

¹ Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Carretera Colima-Coquimatlán Km 9, Valle de las Huertas, Coquimatlán, Col., México, 28400.

{fermin_maciel, lsoriano, victorc, alvarez_jose, urielmora55}@ucol.mx

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Av. Chapultepec 1570, Privadas del Pedregal, San Luis Potosí, México, 78295.

ruben.soria@uaslp.mx

Abstract

Wireless communication systems have evolved to offer a greater amount of services at a lower and lower cost. To achieve this, systems have been continually improved to offer better spectral and energy efficiency for better use of available resources, which has reduced energy resource costs towards sustainable systems. Schemes with multiple antennas known as MIMO systems have been introduced in virtually all communication standards due to their good spectral and energy use thanks to multiple access by spatial division. Multi-user scheduling is a very important aspect in systems where the aim is to make the most of available resources and deliver the maximum possible capacity to users at all times. This paper deals with the performance analysis in terms of channel capacity and spectral efficiency of low complexity user selection and post-processing techniques in a MIMO system with inter-cellular interference.

Keywords— Channel Capacity, User Selection, Post-Processing, MIMO, Interfering Channels

Resumen

Los sistemas de comunicación inalámbrica han evolucionado para ofrecer una mayor cantidad de servicios a un costo cada vez menor. Para lograr esto, los sistemas se han mejorado continuamente para ofrecer una mejor eficiencia espectral y energética para un mejor uso de los recursos disponibles, lo que ha reducido los costos de los recursos energéticos hacia sistemas sostenibles. Los esquemas con múltiples antenas conocidos como sistemas MIMO se han introducido en prácticamente todos los estándares de comunicación debido a su buen aprovechamiento espectral y energético gracias al acceso múltiple por división espacial. La calendarización multiusuario un aspecto muy importante en sistemas donde se pretende aprovechar al máximo los recursos disponibles y entregar la máxima capacidad posible en todo momento a los usuarios. Este artículo trata sobre el análisis del rendimiento en términos de capacidad de canal y eficiencia espectral de técnicas de selección de usuario y posprocesamiento de baja complejidad en un sistema MIMO con interferencia intercelular.

Palabras clave— Capacidad de Canal, Selección de Usuarios, Posprocesado, MIMO, Canales Interferentes

* Autor de correspondencia

I. Introducción

Un aspecto fundamental de las comunicaciones inalámbricas es que todas están compartiendo el mismo medio, el aire, por lo tanto, la interferencia siempre debe considerarse en el diseño de los sistemas que requieren una reutilización más agresiva buscando un mayor aprovechamiento espectral. La interferencia es el resultado de la superposición de las señales que se transmiten a través del aire y que son observadas por múltiples usuarios que comparten el espectro.

Existen diferentes maneras de tratar la interferencia, de las que destacan tres enfoques tradicionales: (i) Decodificar la señal interferente, (ii) Tratar la interferencia como ruido y, (iii) Ortogonalizar la señal deseada y la interferencia.

La decodificación de la señal interferente (i) es menos común en la práctica debido a la complejidad, así como resulta más difícil de generalizar el sistema para más de dos usuarios. Al decodificar la señal interferente es posible restarla de la señal recibida y así obtener una estimación precisa de la señal deseada. Tratar la interferencia como ruido (ii) puede ser una opción si la potencia de la señal interferente es baja, pero esta condición es un factor limitante y menos probable en la mayoría de los casos en donde se requiere una reutilización de frecuencias agresiva. Por último, evitar la interferencia desde el principio por la ortogonalización (iii) de la señal deseada y la interferencia es el enfoque más común para superar este aspecto fundamental en las comunicaciones inalámbricas, sin embargo, con este método, la capacidad del sistema está aun inherentemente limitada por interferencia, ya que el número total de dimensiones de señalización se divide entre los usuarios. Esta solución corresponde a una interpretación tal como dividir un pastel, donde hay un recurso compartido que debe ser dividido por todos los usuarios, ya sean dimensiones de frecuencia, intervalos de tiempo, entre otros [1].

La técnica conocida como Alineación de Interferencias (IA) se propuso para resolver el problema de la interferencia cuando hay múltiples enlaces de comunicación [2]. Sin embargo, el marco técnicas IA existentes para redes celulares proponen aún retos para su implementación práctica: el esquema propuesto en [3] requiere una extensión de dimensión de dominio de tiempo/frecuencia arbitrariamente grande, y el esquema propuesto en [4] se basa en la optimización iterativa de matrices de pre-codificación sufriendo de largos tiempos de ejecución.

Para resolver los retos de las técnicas pre-codificación de IA en sistemas MIMO y aprovechar la diversidad multiusuario en redes con gran densificación de usuarios, aparecieron las técnicas oportunistas de alineación de interferencias (OIA), que tratan de disminuir la interferencia seleccionando a aquellos usuarios cuyas condiciones

de canal de señales interferentes se encuentran lo más alineado posible, de esta manera con técnicas sencillas de baja complejidad pueden, sino eliminar completamente la interferencia, disminuirla a valores suficientemente bajos.

Los autores en [5] propusieron una técnica donde cada estación base (BS) selecciona de manera oportunista a los usuarios que generan la mínima interferencia a las otras BS. En [6] los autores demuestran que OIA solo requiere una pequeña cantidad de usuarios para lograr un rendimiento comparable al de los esquemas tradicionales de IA con retroalimentación cuantificada. En [7] proponen un diseño donde cada usuario emplea un diseño de vector con una estrategia de control de potencia en el sentido de minimizar la cantidad de interferencia generada a otras estaciones base mientras se satisface una calidad de señal requerida. En [8] se propone una nueva métrica para medir las señales interferentes basados en el volumen del paralelepípedo formado por las señales interferentes.

En trabajos recientes, en [9] se analizaron los grados de libertad (DoF) en técnicas OIA y la tasa de transmisión alcanzables en un sistema MIMO de canal interferente de enlace broadcast (MIMO-IBC). En [10] se aprovecharon las variaciones del tiempo de coherencia del canal para proponer una técnica blind-OIA, en donde no se tiene disponibilidad del estado del canal instantáneo en las BSs. En [11] se analiza la justeza (fairness) en técnicas OIA incrementando la probabilidad de atender a usuarios que no tengan mucha probabilidad de ser calendarizados.

En este artículo, se analiza un sistema MIMO de canales interferentes (MIMO-IC), en donde cada BS pretende atender a un usuario compartiendo los recursos espectrales. Este tipo de sistemas resulta muy útil en zonas con gran afluencia de usuarios que tengan disponibilidad de puntos de acceso cercanos para así poder hacer un uso eficiente de sus recursos energéticos. Al tener varios nodos cercanos, la interferencia que se crea es muy grande, por lo tanto no se puede tratar como ruido. Por ello se analiza una técnica de selección y filtro de post-procesado en donde se busca minimizar la señal interferente más ruido (INR). En los resultados de simulación se muestra la capacidad de canal alcanzable para 1, 2 y 3 nodos transmisores. Para 1 nodo transmisor se observa que no es necesario realizar una calendarización basada en indicador de calidad de canal (CQI), sino que se puede optar por técnicas de acceso aleatorio. Para 2 nodos transmisores, la cantidad de antenas en transmisión y recepción, permiten utilizar técnicas de post-procesado que pueden eliminar la interferencia, por lo tanto con técnicas de selección aleatoria es suficiente para el funcionamiento adecuado del sistema. Por otro lado, con 3 nodos se observa que es imprescindible realizar una selección de usuarios aprovechando la diversidad espacial existente,

ya que el algoritmo aleatorio da un desempeño muy reducido. Con esto se demuestra la necesidad de utilizar técnicas de calendarización y post-procesado en donde se puede mejorar el desempeño del sistema aprovechando los recursos disponibles.

Este artículo se organiza de la siguiente manera; en la sección II se presenta el modelado del sistema MIMO de canales interferentes con las señales involucradas. En la sección III, se presenta la estrategia de calendarización y postprocesado para la minimización de interferencia más ruido. En la sección IV, se presenta el análisis de resultados de simulación. Finalmente, en la sección V se describen las conclusiones del artículo.

II. Modelado del sistema

II.1. Sistema MIMO de Canales Interferentes

Un sistema MIMO de canales interferentes se refiere a un sistema en donde se tienen múltiples nodos o estaciones base compartiendo los mismos canales en tiempo y frecuencia. En el entorno de telefonía celular se dice que la reutilización de frecuencias es unitaria. Este tipo de sistemas aumenta significativamente la eficiencia total debido a la disponibilidad de mayor cantidad de canales. En contrapartida, los nodos deben realizar una cuidadosa calendarización de los usuarios para evitar la interferencia que se puede generar. En el caso de tener 3 nodos, se tendrían 2 nodos interferentes en todo momento.

Los sistemas MIMO pueden aprovechar la diversidad espacial siempre y cuando la separación entre antenas sea suficiente y el canal tenga suficiente dispersión. Cuando se tienen múltiples antenas, los nodos pueden aplicar técnicas de pre-codificación para preparar sus señales de acuerdo a la condición de los canales, también los receptores pueden aplicar técnicas de post-procesado para eliminar la interferencia residual.

En la Figura 1 se ilustra un sistema MIMO en canales interferentes (MIMO-IC) en donde se tienen 3 estaciones base (BS) que envían datos al mismo tiempo a sus respectivos receptores móviles (MS) con 2 antenas transmisoras ($M = 2$) y 2 antenas receptoras ($N = 2$). Se observan las señales con línea continua referentes a las señales enviadas desde la BS- i hacia el MS- i y las señales interferentes en línea punteada desde la BS- j hacia el MS- i en donde $i \neq j$. De esta manera la BS-1 se comunica con el MS-1, la BS-2 se comunica con el MS-2 y así sucesivamente. Cabe mencionar que este sistema se puede extender a mayor cantidad de pares de nodos.

Del lado de cada una de las BS se ejemplifican en diferentes colores los vectores que representan pre-codificadores que se aplican en cada BS. Estos vectores se refieren a la magnitud y fase que se aplica a cada señal transmitida en cada antena de cada estación base. Estos vectores se deben calcular de manera que en cada uno de

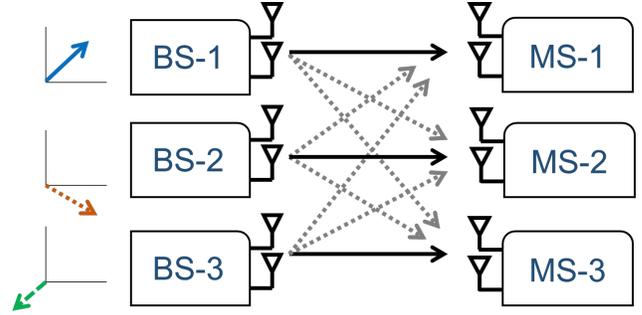


Figura 1: Sistema MIMO de canal interferente para $K = 3$, $M = 2$ y $N = 2$

los receptores las señales interferentes estén alineadas, de esta manera cada receptor sólo observa una señal interferente la cual puede eliminar mediante una técnica de post-procesado.

El sistema MIMO de canal interferente con K -nodos consiste en K pares de transmisores y receptores al igual como se ilustra en la Figura 1, en donde $K = 3$. En este tipo de sistema cada transmisor envía información hacia su receptor correspondiente y genera interferencia a $K - 1$ receptores.

La señal recibida por el i -ésimo receptor en el sistema MIMO-IC está dada por

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_{[i,i]} \mathbf{W}_i \mathbf{s}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{[j,i]} \mathbf{W}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{n}_i, \quad (1)$$

donde $\mathbf{H}_{[i,j]} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ representa la matriz compleja del canal directo entre el transmisor i y el receptor i , $\forall i \in \{1, 2, \dots, K\}$. Donde N es la cantidad de antenas en el receptor y M es la cantidad de antenas en el transmisor. $\mathbf{H}_{[j,i]} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ representa la matriz compleja del canal interferente entre el transmisor j y el receptor i , $\forall i, j \in \{1, 2, \dots, K\}$ teniendo en cuenta que $i \neq j$. $\mathbf{W}_i \in \mathbb{C}^{M \times d}$ es la matriz de precodificación del i -ésimo transmisor. Donde d se refiere a las cadenas de transmisión asignadas a cada receptor. $\mathbf{s}_i \in \mathbb{C}^{d \times 1}$ es el vector de señal transmitida al usuario i . El vector de ruido en el receptor i $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ se modela como un ruido aditivo blanco Gaussiano con media 0 y varianza $\sigma_{\mathbf{n}_i}^2$. Finalmente, $\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ es el vector complejo de señal recibida en el usuario i .

La sumatoria en la ecuación 1 corresponde a la interferencia de los transmisores cuya señal es no deseada. Debido que este término es significativo, en la mayoría de los casos no puede ser ignorado ni tratado como ruido ya que afectaría gravemente el rendimiento.

Para recuperar la señal deseada se aplica un filtro de post-procesado en el i -ésimo receptor $\mathbf{V}_i \in \mathbb{C}^{N \times d}$, lo cual nos lleva a la señal post-procesada \hat{y}_i

$$\hat{y}_i = \mathbf{V}_i^H \mathbf{y}_i = \mathbf{V}_i^H \mathbf{H}_{[i,i]} \mathbf{W}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{V}_i^H \sum_{j=1, j \neq i}^K \mathbf{H}_{[i,j]} \mathbf{W}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{V}_i^H \mathbf{n}_i. \quad (2)$$

Los vectores \mathbf{W}_i y \mathbf{V}_i , se pueden calcular mediante técnicas de alineación de interferencias (IA). De forma cerrada para $K = 3$ se pueden calcular las matrices mediante el algoritmo presentado en [2]. Para $K > 3$ se puede optar por algoritmos iterativos como el algoritmo de minimización alternada [12] así como el algoritmo de maximización de la SINR [13]. En los algoritmos propuestos por los autores en [2],[12] y [13] se tienen las siguientes problemáticas:

- Se requiere una cooperación entre los nodos, es decir deben tener una unidad central de proceso que controle todas las BSs.
- Se requiere un conocimiento global de la información del estado del canal entre todos los nodos transmisores, lo que conlleva a una alto overhead.
- En los dos últimos se requiere una optimización iterativa.

Para evitar estas problemáticas mencionadas, en este artículo se opta por un sistema de transmisión oportunistas para el cálculo de las matrices de precodificación.

III. Ecuación y Calendarización

III.1. Minimización de la Señal de Interferencia más Ruido

En la Figura 2 se muestra en verde (línea continua) las señales de interés que son las señales interferentes, como se puede observar las señales en color gris (línea punteada) son las señales deseadas, en este caso se tratan como ruido a la hora de aplicar el combinador. Para este esquema, es necesario que el receptor tenga conocimiento del estado de los canales interferentes. En este algoritmo el usuario i busca minimizar la señal de interferencia más ruido (INR) en el lado del receptor mediante la aplicación de un filtro de post-procesado \mathbf{v}_i^{INR} a la señal recibida y_i .

En este algoritmo se detalla cómo se obtienen los vectores de pre-codificación y los vectores de post-procesado definidos por \mathbf{w}_i y \mathbf{v}_i , para el i -ésimo nodo transmisor y el i -ésimo receptor respectivamente.

La señal recibida y_i en el MS- i está dada por:

$$y_i = \alpha_{i,i} \mathbf{H}_{i,i} \mathbf{w}_i s_i + \alpha_{j,i} \mathbf{H}_{j,i} \mathbf{w}_j s_j + \mathbf{n}_j \quad (3)$$

Donde $\mathbf{H}_{j,i}$ representa la señal de la BS- j hacia el MS- i y \mathbf{n}_i el ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN) referente al ruido térmico y s_i es la señal modulada que va hacia el receptor i . En este caso se quiere minimizar la señal

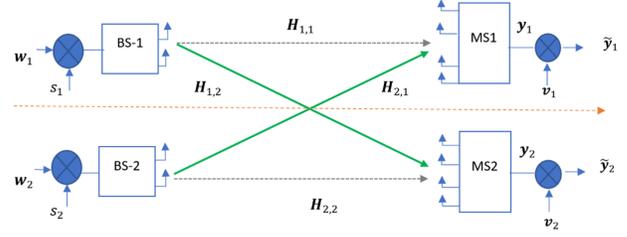


Figura 2: Modelo del sistema interferente minimización de INR (caso de estudio) donde $M = 2$, $N = 4$, $K = 2$, $d = 1$, $S = 1$

de interferencia inter-celular $\mathbf{H}_{j,i} \mathbf{w}_j s_j$ procedente de la BS- j hacia el MS- i . Finalmente, $\alpha_{j,i}$ representa la pérdida por trayectoria desde la base j hacia el usuario i , finalmente \mathbf{w}_j es el pre-codificador en el nodo j . En el algoritmo de minimización de la INR, se considera la matriz equivalente para MS- i en la base BS- j para el caso de $K = 2$

$$\mathbf{Q}_{j,i} = \alpha_{j,i} \frac{P}{d} \mathbf{H}_{j,i} \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H \mathbf{H}_{j,i}^H \quad (4)$$

Que en general puede escribirse para $K > 2$ como:

$$\mathbf{Q}_{j,i} = \frac{P}{d} \sum_{n=1, n \neq j}^K \alpha_{j,i} \mathbf{H}_{j,i} \mathbf{w}_n \mathbf{w}_n^H \mathbf{H}_{j,i}^H \quad (5)$$

donde P es la potencia transmitida y d son los grados de libertad del sistema. El MS- i calcula su vector de post-procesado de la siguiente manera:

$$\mathbf{v}_i^{INR} = \mathbf{v}_i(\mathbf{Q}_{j,i}) \quad (6)$$

III.2. Selección de usuario de min-INR

En este tipo de algoritmo el transmisor selecciona a los usuarios que tengan una mínima interferencia más ruido. Para ello los usuarios retroalimentan a sus respectivas BSs un indicador de calidad de canal (CQI) y el nodo transmisor selecciona a los usuarios que se encuentren en mejores condiciones referentes a la métrica de INR. El CQI que retroalimenta el i -ésimo usuario se da por:

$$\frac{1}{d} \sum_{l=N-d+1}^N \sigma_l(\mathbf{Q}_{j,i}) \quad (7)$$

donde $\sigma_l(\mathbf{Q}_{j,i})$ denota el l -ésimo valor singular de la matriz $\mathbf{Q}_{j,i}$. Por lo tanto, el i -ésimo transmisor selecciona de manera oportunista a un usuario S_i como:

$$S_i = \arg \min_{S_i \in S} \sum_{l=1}^d (\mathbf{Q}_{j,i}) \quad (8)$$

IV. Análisis de resultados de simulación

En esta sección se muestran los resultados en términos de capacidad de canal de las simulaciones obtenidas a través de gráficas y tablas, con distintos parámetros del sistema para el algoritmo de selección de usuarios y equalización para la Minimización de la Interferencia.

IV.1. Parámetros del sistema

Los parámetros del sistema referentes al tipo de canal, cantidad de nodos, usuarios por nodo, cantidad de antenas en cada transmisor (Tx) y receptor (Rx), entre otros se mencionan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de Simulación.

Parámetro	Definición
$\mathbf{H}_{[i,i]}$	Matriz de canal
K	Cantidad de nodos
N	Antenas en cada Rx
M	Antenas en cada Tx
S	Usuarios por nodo
SNR	Relación señal a ruido
C	Capacidad de canal

IV.2. Capacidad de Canal para el algoritmo min-ISR

En la Tabla 2 se muestran los resultados en términos de capacidad de canal del algoritmo min-ISR con los valores de $K = 2$ y $K = 3$, la cantidad de antenas receptoras $N = 2$ y transmisoras $M = 2$, cantidad de usuarios en cada nodo $S = 50$.

Tabla 2: Capacidad de Canal para el algoritmo min-ISR con $K = 1$, $K = 2$ y $K = 3$.

SNR	C para $K = 1$	C para $K = 2$	C para $K = 3$
5	1.6	3.4	5
10	2.9	5.8	8.4
15	4.3	8.7	12.1
20	5.8	11.9	15.2
25	7.5	14.9	17.6
30	9	18.3	18.9

En la figura 3 se muestra un caso en el cual $K = 1$, es decir sólo se tiene un nodo transmisor y se deben seleccionar usuarios, en este caso se opta por la selección que maximice la relación señal a ruido (SNR), se observa también el resultado del algoritmo aleatorio, como su nombre lo dice se selecciona de manera aleatoria a los usuarios, sin embargo una vez seleccionados los usuarios requieren aplicar un vector de post-procesado el cual, se

refiere al vector que maximice la SNR. Se observa que en este caso resulta una mejor opción considerar el algoritmo que maximice la SNR debido a que no hay interferentes para aplicar el algoritmo min-ISR de la sección III. Se observa una ganancia de más de 3 bps/Hz a diferencia del algoritmo min-ISR cuando $K = 1$. Sin embargo, este es un caso trivial en donde no existen nodos interferentes, se realiza sólo para cuestiones comparativas.

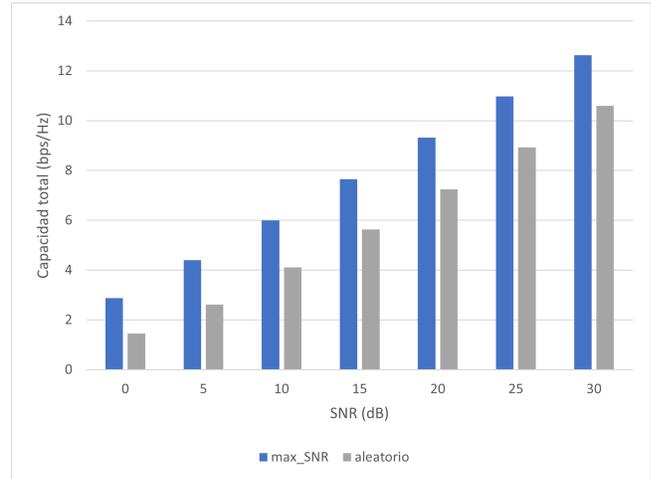


Figura 3: Comparativa de Capacidad de Canal para selección de usuarios con algoritmo max-SNR y algoritmo de selección aleatoria con $K = 1$, $M = 2$ y $N = 2$, $S = 50$

En la figura 4 se observa la Capacidad vs SNR la cual sigue la tendencia mencionada en la Tabla 2. Se compara el algoritmo min-ISR con el algoritmo que selecciona a los usuarios de manera aleatoria pero los usuarios en ambos casos utilizan el mismo equalizador. Aquí el algoritmo de selección de usuarios que minimice la ISR y el algoritmo aleatorio obtienen el mismo rendimiento, esto sucede ya que es un caso trivial en donde se puede eliminar por completo la interferencia por la cantidad de ecuaciones e incógnitas. Para esta situación se observa que no es necesario un algoritmo de selección de usuarios ya que el indicador de canal que retroalimenta los usuarios tiende a cero debido a que es posible eliminar por completo la interferencia.

En la Figura 5 se observa una ventaja muy grande si se compara el algoritmo de selección de usuarios min-ISR y el algoritmo aleatorio ya que este ya no es un caso trivial por la cantidad de ecuaciones e incógnitas y no es posible eliminar completamente la interferencia. Por lo tanto, el indicador de canal que retroalimenta cada usuario ya no tiende a cero y es conveniente seleccionar a los usuarios que minimicen la interferencia teniendo una ganancia de más de 10 bps/Hz en altos niveles de SNR.

Con los resultados obtenidos en las figuras 4-5 se pudo observar la necesidad de un algoritmo de selección de

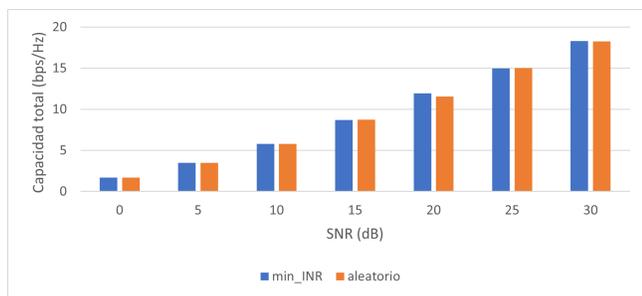


Figura 4: Comparativa de Capacidad de Canal para selección de usuarios con algoritmo min-INR y algoritmo de selección aleatoria con $K = 2$, $M = 2$ y $N = 2$, $S = 50$

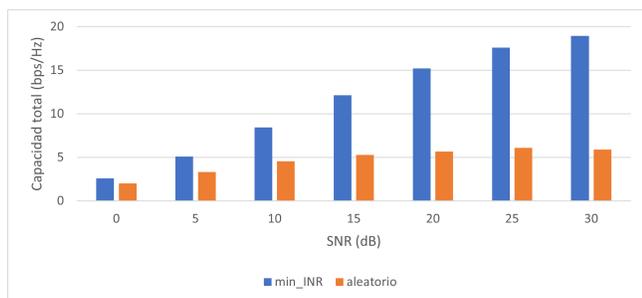


Figura 5: Comparativa de Capacidad de Canal para selección de usuarios con algoritmo min-INR y algoritmo de selección aleatoria con $K = 3$, $M = 2$ y $N = 2$, $S = 50$

usuarios en los casos en los cuales no es posible eliminar por completo la interferencia. Se observa además que es posible obtener una ventaja en términos de capacidad cuanto mayor sea la cantidad de nodos debido a que se puede aprovechar la diversidad espacial y seleccionar aquellos usuarios en donde las señales interferentes tengan mayor alineación.

Finalmente, en la figura 6, se muestra una comparativa entre los algoritmos max-SNR y min-INR, en esta interesante comparativa se observa que a bajos niveles de SNR, no habrá tanta afectación de interferencia por lo tanto hasta alrededor de 10 dB no hay ganancia con el algoritmo min-INR, sin embargo, a altos niveles de SNR (> 10 dB) el algoritmo min-INR muestra un resultado muy superior.

V. Conclusiones

En este artículo se abordó el estudio de la selección de usuarios y el post-procesado de baja complejidad en un sistema MIMO con interferencia inter-celular así como el análisis de las mismas en términos de capacidad de canal. Se estudió la detección y post-procesado para la maximización de la SNR (max-SNR) y la minimización

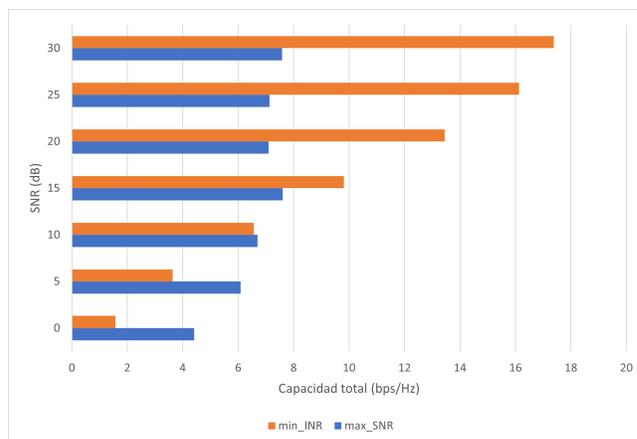


Figura 6: Comparativa de Capacidad de Canal para selección de usuarios con algoritmo min-INR y algoritmo max-SNR con $K = 3$, $M = 2$ y $N = 2$, $S = 50$

de la INR (min-INR). El comportamiento del algoritmo max-SNR fue bueno a bajos niveles de SNR en donde no hay gran afectación de la interferencia, sin embargo se observó que el algoritmo min-INR es capaz de mejorar el desempeño a niveles medio y alto de SNR tomando por el simple hecho de no considerar la interferencia en el diseño del ecualizador. Resulta entonces interesante pensar en un algoritmo adaptativo que aproveche las bondades y las condiciones en donde cada algoritmo pueda entregar un mejor rendimiento. No obstante, este tema se considera para un trabajo a futuro. Los esquemas con múltiples antenas conocidos como sistemas MIMO se han ido introduciendo en prácticamente todos los estándares de comunicaciones debido a su buen aprovechamiento espectral y energético gracias al acceso múltiple por división espacial (SDMA). Los sistemas celulares se han caracterizado por esquemas de reutilización de frecuencias, sin embargo, esto hace que no se disponga de gran cantidad de recursos en una célula, además de que se tienen esquemas fijos que no permiten adaptarse a cambios constantes en la red. Los sistemas MIMO interferente demuestran tener un gran potencial gracias a la reutilización total de los recursos en los nodos transmisores. Las técnicas de transmisión y detección con múltiples antenas aprovechan los grados de libertad disponibles en el dominio espacial para poder transmitir señales a múltiples usuarios y mejorar la capacidad total de los sistemas.

Referencias

- [1] Syed A. Jafar. *Interference Alignment: A New Look at Signal Dimensions in a Communication Network*. Now Publishers, 2011.

- [2] Viveck R. Cadambe y Syed Ali Jafar. «Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K User Interference Channel». En: *IEEE Transactions on Information Theory* 54.8 (2008), págs. 3425-3441. DOI: 10.1109/TIT.2008.926344.
- [3] Changho Suh y David Tse. «Interference Alignment for Cellular Networks». En: *2008 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*. 2008, págs. 1037-1044. DOI: 10.1109/ALLERTON.2008.4797673.
- [4] Tiangao Gou y Syed A. Jafar. «Degrees of Freedom of the K User $M \times N$ MIMO Interference Channel». En: *IEEE Transactions on Information Theory* 56.12 (2010), págs. 6040-6057. DOI: 10.1109/TIT.2010.2080830.
- [5] Bang Chul Jung y Won-Yong Shin. «Opportunistic Interference Alignment for Interference-Limited Cellular TDD Uplink». En: *IEEE Communications Letters* 15.2 (2011), págs. 148-150. DOI: 10.1109/LCOMM.2011.121310.101439.
- [6] Johann Leithon y col. «A new opportunistic interference alignment scheme and performance comparison of MIMO interference alignment with limited feedback». En: *2012 IEEE Globecom Workshops*. 2012, págs. 1123-1127. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477736.
- [7] Jangho Yoon, Won-Yong Shin y Hwang Soo Lee. «Energy-Efficient Opportunistic Interference Alignment». En: *IEEE Communications Letters* 18.1 (2014), págs. 30-33. DOI: 10.1109/LCOMM.2013.111513.131938.
- [8] F. M. Maciel-Barboza y col. «Volume Based Opportunistic Interference Alignment over Correlated MIMO IBC». En: *2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP)*. 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/CSNDSP.2018.8471828.
- [9] Long Suo y col. «Achievable Sum Rate and Degrees of Freedom of Opportunistic Interference Alignment in MIMO Interfering Broadcast Channels». En: *IEEE Transactions on Communications* 67.6 (2019), págs. 4062-4073. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2903250.
- [10] Milad Johnny y Alireza Vahid. «Exploiting Coherence Time Variations for Opportunistic Blind Interference Alignment». En: *IEEE Transactions on Communications* 68.10 (2020), págs. 6054-6069. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3011687.
- [11] Huabing Lu y col. «Fairness Enhancement for Opportunistic Interference Alignment Algorithm With Low Latency Communications». En: *IEEE Systems Journal* 14.4 (2020), págs. 5002-5013. DOI: 10.1109/JSYST.2020.2969481.
- [12] Steven W. Peters y Robert W. Heath. «Interference alignment via alternating minimization». En: *2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. 2009, págs. 2445-2448. DOI: 10.1109/ICASSP.2009.4960116.
- [13] Krishna Gomadam, Viveck R. Cadambe y Syed A. Jafar. «A Distributed Numerical Approach to Interference Alignment and Applications to Wireless Interference Networks». En: *IEEE Transactions on Information Theory* 57.6 (2011), págs. 3309-3322. DOI: 10.1109/TIT.2011.2142270.

Descriptive survey of LoRaWAN and specific applications

Estudio descriptivo de LoRaWAN y aplicaciones específicas

Juan. P. Morales-Alvarez¹, Víktor I. Rodríguez-Abdalá², Fermin M. R. Maciel-Barboza³, and Francisco R. Castillo-Soria⁴

¹ *Tecnológico Nacional México campus La Paz,*
Departamento de Metalmecánica,
Boulevard Forjadores de Baja California Sur No.4720, C.P. 23080, La Paz, B.C.S.
juan.ma@lapaz.tecnm.mx

² *Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,*
Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Telecomunicaciones,
Av. López Velarde 801, Col. Centro, Zacatecas, Zac., México, 98000.
abdala@uaz.edu.mx

³ *Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,*
Coquimatlán, Col, 28400, México.
fermin_maciel@uacol.mx

⁴ *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias,*
S. L. P., México.
ruben.soria@uaslp.mx

Abstract

The Internet of Things requires long range communication protocols and low energy consumption. Among these protocols is LoRaWAN, which operates in ISM radio bands at frequencies below 1 GHz. It has a coverage of several kilometers in line of sight, and it is ideal for urban and rural areas. The data transfer rate is low, which leads to low energy consumption, greater autonomy of battery-powered sensors and allows the development of Internet of Things applications. The protocol architecture includes Gateways to connect the sensors to the Internet, which can process thousands of messages simultaneously in up to 10 channels.

In this article, we analyze different LoRaWAN Gateways based on appliances to describe applications used in this protocol. The architecture and protocol of LoRaWAN and the LoRa PHY layer are also described.

Keywords— LoRa, LoRaWAN, Gateways, IoT

Resumen

El Internet de las Cosas requiere de protocolos de comunicación de largo alcance y bajo

consumo de energía. Entre estos protocolos se encuentra LoRaWAN, el cual opera en bandas de radio ISM en frecuencias inferiores a 1 GHz. Cuenta con una cobertura de varios kilómetros en línea de vista, y es idóneo para zonas urbanas y rurales. La tasa de transferencia de datos es baja, lo que conlleva a un bajo consumo de energía, mayor autonomía de sensores alimentados por baterías y permite el desarrollo de aplicaciones del Internet de las Cosas. La arquitectura de este protocolo incluye Gateways para conectar los sensores al Internet, los cuales pueden procesar miles de mensajes simultáneamente en hasta 10 canales.

En el presente artículo se analizan distintos Gateways LoRaWAN en función de usos específicos para describir aplicaciones de uso de este protocolo. También se describe la arquitectura y el protocolo de LoRaWAN y la capa física LoRa.

Palabras clave— LoRa, LoRaWAN, Gateways, IoT

I. Introducción

El internet de las cosas (IoT, del inglés Internet of Things) permite que cualquier dispositivo doméstico o industrial, tal como sensores y actuadores

puedan estar conectados a Internet. La conectividad de estos dispositivos requiere de tecnologías de bajo consumo de energía y bajo costo, porque operan básicamente con baterías y se espera que puedan conectarse a largas distancias de manera inalámbrica [1]. Las primeras redes de sensores utilizaban en gran medida protocolos de corto alcance interconectando objetos en redes personales (PAN, del inglés Personal Area Network) a través de: Zigbee, Bluetooth, RFID o Wi-Fi, en este último la fuente de alimentación de algunos dispositivos está conectada a la red eléctrica. Con excepción de las conexiones Wi-Fi, los sensores realmente no están conectados a Internet, sino que se conectan a un dispositivo intermedio como un dispositivo móvil, y en la mayoría de los casos, los datos se quedan dentro de las redes PAN formadas por el usuario [2]. El IoT tiene su origen en las redes de sensores inalámbricos (WSN, del inglés Wireless Sensor Networks).

Debido a las limitaciones que presentan las WSN ante escenarios del IoT que requieren de comunicaciones de largo alcance y conexiones masivas de dispositivos, así como evitar en la medida de lo posible los múltiples saltos, emergió una solución desde las redes de área extensa de baja potencia (LPWAN, del inglés Low Power Wide Area Network) [3]. Es por esto que se puede ver a LPWAN como el siguiente paso evolutivo de las WSN [4], cabe notar que estas no se enfocan a la alta transferencia de datos sino a la cobertura de largo alcance que va desde varios cientos de metros hasta varios kilómetros con un muy bajo consumo de energía, conectando miles de dispositivos en un solo salto a un nodo principal conocido como Gateway (GW), en una topología tipo estrella, en esta categoría están los protocolos LoRaWAN, Sigfox, LTE-M, DASH7 y NB-IoT [1, 3, 4].

LoRaWAN permite interconectar dispositivos de bajo consumo de potencia, que son alimentados por batería, durante largos periodos de tiempo sin ser estas remplazadas [4, 5]. LoRaWAN ha arrojado resultados favorables en su uso tanto en interiores como exteriores [1, 2]. Debe hacerse la aclaración que es una solución para redes donde el objetivo que se desea alcanzar de monitoreo no se vea afectado por la tasa de transferencia de datos de este protocolo, la cual es idónea para interconectar dispositivos autónomos a larga distancia que envían sus datos a un servidor de red.

LoRaWAN define una arquitectura de red que se puede dividir en dos partes: el back-end, que contiene el servidor de red y almacenamiento en la nube para procesamiento y consulta de los datos; y el front-end, que se compone de los nodos y el GW. La información entre los GWs y los servidores se realiza vía el protocolo de internet (IP del inglés, Internet Protocol) a través de un enlace seguro, y entre nodos y GWs el canal físico es LoRa [5]. En LoRaWAN son los GWs los que están conectados a

Internet no los nodos, ya que estos solo recopilan los datos para los que fueron diseñados.

La Fig. 1 muestra la pila de protocolos de LoRaWAN y las bandas de transmisión de acuerdo a las regiones.

Aplicación				
LoRaWAN MAC				
Opciones MAC				
Clase A	Clase B	Clase C		
Modulación LoRa				
Banda ISM				
EU 868	EU 433	US 915	AS 430	-

Figura 1: Pila de protocolos de LoRaWAN [6].

El protocolo LoRaWAN fue desarrollado por LoRa Alliance, y la capa física y modulación inalámbrica de largo alcance LoRa está patentada por Semtech [6]. LoRa utiliza la banda sin licencia de frecuencia de uso libre conocida como ISM para uso Industrial, Científico y Médico abajo de 1 GHz.

Entre las ventajas de LoRaWAN se encuentra la capacidad de que los GWs reciban mensajes de miles de nodos y los envíen al servidor de red, en ciertas circunstancias 8000 nodos representan un porcentaje aceptable y manejable de colisión de paquetes, ya que cada nodo puede transmitir el mensaje a más de un GW[7]. La capacidad de los GWs se basa en la gestión de los canales donde simultáneamente se reciben y transmiten mensajes desde y hacia los nodos, la tasa de transferencia de datos, el tamaño de la carga útil y la calendarización de transmisión de los nodos. El GW recibe los mensajes desde los nodos y los envía al servidor de red, también puede recibir del servidor de red y enviar hacia los nodos. Los nodos pueden transmitir a más de un GW, estos utilizan el protocolo IP en su comunicación al servidor de red y este último es quien decide que GW utilizar si desea enviar un dato a un nodo [8, 9].

El objetivo de este artículo es presentar un análisis detallado de los Gateways LoRaWAN utilizados en soluciones específicas que se han desarrollado, estas incluyen el uso de prototipos y Gateways comerciales, también se realiza una descripción del protocolo LoRaWAN y una comparativa de prestaciones entre varios Gateways comerciales.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II, se analizan los Gateway LoRaWAN utilizados en diferentes usos específicos. En la Sección III, se revisa el protocolo LoRaWAN. En la Sección IV, muestra una comparativa de distintos Gateways comerciales y la

Sección V, describe las conclusiones.

II. Gateways LoRaWAN desarrollados para uso específico

En la revisión de la literatura sobre las tendencias en el desarrollo de GW LoRaWAN se encuentra lo siguiente:

En [10] se muestra el diseño de un sistema para el monitoreo de temperatura y humedad del suelo a través de nodos que envían la información recolectada a un GW LoRa/NB-IoT. Los nodos de este sistema se implementaron con el microcontrolador STM32F103ZET6 de la ST Company, el cuál utiliza un procesador Cortex M3 y utilizan LoRa para la comunicación. El diseño del GW se basa en el mismo microcontrolador de los nodos e incluye además el protocolo NB-IoT. El escenario del experimento fue un complejo urbano y se logró la comunicación entre dispositivos a una distancia de hasta 1.6 km con un consumo de 2 mA en los nodos. Los autores calculan la pérdida de datos en aproximadamente 3% de los paquetes enviados.

En el diseño de un sistema de monitoreo de motores de inducción [11] se desarrolló una red que implementa LoRaWAN, los GW que se implementaron fueron de la familia LG0 y OLG0 de Dragino Systems recomendados para uso privado de LoRa. Estos soportan uno o dos canales dependiendo el modelo, y pueden escuchar de 50 a 300 nodos. Se basan en los módulos LoRa SX1276/SX1278 además cuenta con interfaz Ethernet y Wi-Fi para transmitir TCP/IP y MQTT. En el experimento se ubicaron nodos al interior de un complejo de edificios para probar la capacidad de LoRa para interiores y exteriores. Los autores concluyeron que LoRa fue una solución para transmitir datos a los GW remotos y con ello medir el desempeño de los motores. La potencia de la señal recibida (RSSI, del inglés Received Signal Strength Indicator) fue entre -58 y -98 dB y la tasa de entrega de datos fue entre 71 y 82% con un tiempo en el aire de 37 ms.

En [12] se presenta un prototipo de GW de bajo costo para recibir mensajes de nodos LoRa y enviar a un servidor de red a través de NB-IoT (AIS NB-IoT). El hardware del GW es un SparkFun RedBoard compatible con Arduino UNO, con un radio LoRa SX1276 y el módulo Quectel BC95 para NB-IoT. El GW se instaló en una torre de aproximadamente 18 m de altura, y el nodo se colocó en un vehículo para hacer mediciones de longitud y latitud por la zona en un radio de 5 km. Se obtuvieron medidas de la comunicación en distintos puntos, en el mayor alcance, de 4-5 km, se enviaron 90 paquetes y solo se perdió uno de ellos. El experimento concluye que el uso del GW LoRa/NB-IoT es una solución muy barata, dado que los nodos que necesitan enviar datos al servidor red lo hacen a través de un solo GW y no de dispositivos NB-IoT directamente en cada punto de medición.

Existen aplicaciones rurales para el seguimiento y monitoreo del ganado [13], donde se describe el diseño de collares de seguimiento basados en nodos LoRa que transmiten a un GW diseñado por los autores, el cual se basa en una placa Raspberry Pi. Aunque se omiten detalles de los módulos y componentes de hardware sí se mencionan otras especificaciones, tales como que el GW también soporta el almacenamiento de datos, cubriendo con ello fallas de conectividad a Internet y que el diseño permite la conexión de periféricos al GW, tales como teclado y monitor. Un usuario también puede conectarse al GW vía Wi-Fi o Bluetooth. Se menciona que el GW podría soportar hasta 40 horas de manera autónoma con un diseño adicional vía paneles solares con lo que las baterías pueden recargarse continuamente.

En [14] se hicieron pruebas de comunicación de nodo a GW para evaluar alcance y pérdida de paquetes. El nodo se desarrolló con Arduino UNO y un radio HopeRF RFM95 para enviar datos de salud como temperatura y presión sanguínea, estos datos fueron enviados en periodos predefinidos hacia centros de salud para seguimiento de pacientes. El GW se desarrolló en una Raspberry PI 3 con el mismo tipo de radio LoRa en una configuración de un canal. Los autores recomiendan el uso de LoRaWAN para aplicaciones de tiempo real si y solo si la carga útil y el factor de esparcimiento (SF, del inglés Spreading Factor) es un valor de 7 u 8, es decir, si la longitud del chirp es de 128 o 256 bytes respectivamente, en otras circunstancias el tiempo de entrega puede ser crítico y no es recomendable.

Otra aplicación LoRaWAN se realizó en [15] con un GW IoT LoRa de Gemtek que garantizan un radio de transmisión de hasta 15 km con los radios SX1301 y SX1257 de Semtech. El GW recibe información de los nodos con módulos LoRa basados en SX1276 instalados sobre placas Arduino UNO, estos son parte de un desarrollo para un sistema remoto de diagnóstico de vehículos, si se detectan anomalías en los datos a través del puerto de Diagnósticos a bordo (OBD, del inglés On-Board Diagnostics), el nodo envía al GW la información y este último a la aplicación en el servidor de red.

Otro trabajo realizado en torno a la salud presenta a LoRa como la base del proyecto. En este [16] los autores diseñan un sistema de seguimiento y monitoreo de personas con enfermedades mentales. Uno de los principales objetivos es la localización de los pacientes para con ello evitar accidentes derivados de la desorientación, el descuido de las personas asignadas al cuidado e incluso prevención del suicidio. La base de los sistemas de monitoreo es la placa Arduino UNO que cuenta con el Dragino LoRa Shield, un sensor GPS y módulo Wi-Fi, adicionalmente cuentan con una fuente de alimentación portátil. Se cuenta con gateways LoRa instalados en hospitales y zonas públicas, estos GW cuentan con las mismas caracte-

rísticas de hardware que los nodos, con excepción de los dispositivos sensores. En este proyecto se puede acceder al servidor de red a través de aplicaciones móviles para dar seguimiento a los pacientes.

En [17] se muestra un proyecto de semáforo inteligente y monitoreo de tráfico. Los sensores del semáforo se conectan a una tarjeta Arduino con soporte LoRaWAN y GPS, en específico la placa Seeeduno LoRaWAN W/GPS, el GW se desarrolló en una Raspberry Pi 3 con un Dragino Lora/GPS HAT que a través a los radios SX1276/SX1278 se comunica con los nodos y el módulo Wi-Fi de la Raspberry Pi se conecta a Internet para enviar los datos al servidor de red.

Se mencionan también trabajos previos en [18] y [19] donde se diseñó GWs LoRa/Bluetooth y LoRa/Wi-Fi respectivamente, utilizados en el desarrollo de un sistema de comunicación de mensajería de texto que puede ser usado en situaciones de emergencias ante desastres naturales como huracanes, temblores u otros y que dejan a las poblaciones afectadas desconectadas ante la falta de energía eléctrica o debido a la ruptura de caminos. Así mismo, este sistema facilita la comunicación de los habitantes de zonas rurales que carecen de servicios de comunicaciones por operadoras móviles.

III. Protocolo LoRaWAN

III.1. El protocolo LoRaWAN.

LoRaWAN es un estándar dentro de las LPWAN, por ello es una especificación que incluye la definición del protocolo LoRaWAN que trabaja con la capa física LoRa. LoRaWAN define la arquitectura de red que consiste en una topología tipo estrella donde se interconectan nodos finales, GWs y servidores de red. Cada nodo se comunica a los servidores a través de los GWs, estos últimos pueden decodificar hasta 10 transmisiones simultáneas de distintos canales y con distintas tasas de transferencia en modulación LoRa. Los GWs envían los datos a los servidores vía IP [4, 5, 20].

La Fig. 2 muestra la arquitectura LoRaWAN donde puede apreciarse que los nodos pueden transmitir sus paquetes a más de un GW.

LoRaWAN define un protocolo de control de acceso al medio (MAC, del inglés Medium Access Control) en un nivel superior a la capa física de LoRa (ver Fig. 1). Como tal ofrece servicios para administrar el acceso al medio, la interoperación de los distintos nodos con los GWs y con ello establecer los mecanismos para controlar la congestión de la red (ver Fig. 2).

LoRaWAN ofrece las siguientes características a los nodos: administración de canal, tasa de transmisión adaptativa (ADR, del inglés Adaptive Data Rate), eficiencia de uso de energía para asegurar el mayor tiempo de vida de las baterías, seguridad tipo AES de 128 bits, en dos

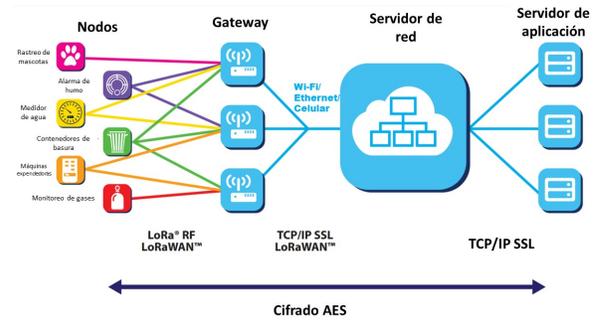


Figura 2: La arquitectura LoRaWAN [8].

capas, una para la red y otra para las aplicaciones, en la seguridad de la red se garantiza la autenticación de los nodos a interconectar, y en la seguridad en las aplicaciones se asegura que el operador de la red no tenga acceso a los datos finales de la aplicación del usuario. LoRaWAN por sus propias características ofrece localización de sus nodos [1, 21].

En la Fig. 3, se describe el protocolo LoRaWAN donde se puede observar las capas de seguridad en la red y en las aplicaciones. Se muestra la modulación LoRa como capa física de comunicación entre nodos y GWs. También se muestra la comunicación interfaz serial (SPI, del inglés Serial Peripheral Interface) con la capa de abstracción de hardware (HAL, del inglés Hardware Abstraction Layer). El diagrama muestra la conexión IP entre el GW y los servidores de red que pueden utilizar distintos estándares, por ejemplo: Ethernet, 3G, 4G y Wi-Fi.

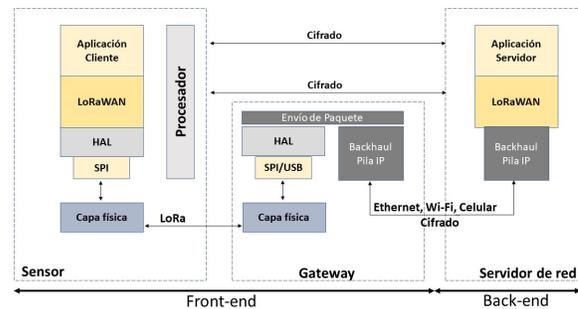


Figura 3: El protocolo de comunicación LoRaWAN [8].

III.1.1. Clases de nodos

Los nodos en LoRaWAN se utilizan para la obtención de datos de acuerdo a aplicaciones determinadas, pero también para el control de sistemas particulares, por lo que pueden ser realmente nodos sensores o nodos actuadores, y por ende tener diferentes requerimientos

de uso de la red y con ello configuraciones personalizadas de transmisión o recepción de datos, por lo que pueden encontrarse en una de las tres clases (ver Fig. 4), las cuales son estrategias de comunicación bidireccionales con servicios particulares.

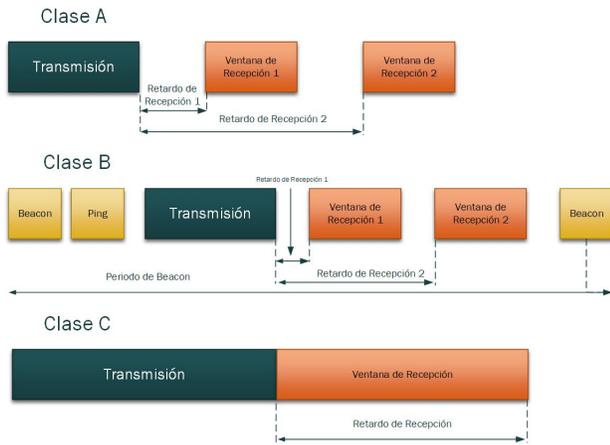


Figura 4: Las diferentes Clases de nodos.

- Clase A: Dado que LoRaWAN busca maximizar la eficiencia de uso de energía ofrece esta primera estrategia basada en el protocolo ALOHA. Dado que cada nodo decide cuando transmitir, los nodos lo intentarán en cada ventana de transmisión y solo un nodo tendrá éxito, cuando haya transmitido obtendrá dos ventanas de recepción durante las cuales podrá escuchar por mensajes de bajada desde algún GW. Los GWs no enviarán una repetición de mensaje, hasta que el nodo que la requiera haya hecho una nueva transmisión y tenga ventanas de recepción. Todos los nodos LoRaWAN deben permitir esta configuración básica. Esta es la configuración de mayor ahorro de energía.
- Clase B: Si la aplicación requiere incrementar la capacidad de recepción de datos, por ejemplo, para nodos que además de sensores utilizan actuadores, esta clase permite abrir ventanas de recepción a intervalos de tiempo previamente programados, para lograrlo los GWs enviarán tramas beacon a los nodos, a la vez podrán recibir respuestas por parte de estos que requieran ventanas adicionales. Esta opción incrementará también el consumo de energía sin embargo sigue siendo una opción muy viable para nodos alimentados por batería.
- Clase C: Si el ahorro de energía del nodo no es prioridad, este tipo de nodo puede estar recibiendo datos en la red continuamente, excepto cuando está enviándolos [1, 8, 21].

El protocolo LoRaWAN utiliza la ADR para asegurar

que los nodos se reconfiguren dinámicamente de acuerdo a las condiciones de la red, ampliando la duración de vida de las fuentes de alimentación basadas en baterías. El servidor de red es el encargado de realizar esta configuración que optimiza la transmisión de mensajes en la red. Sin embargo, solo la realiza a petición de los nodos, son estos quienes activan el bit ADR en las transmisiones. El nodo debe ser capaz de identificar si se encuentra en movilidad y si las condiciones del canal son lo suficientemente estables para entonces hacer la petición de ADR al servidor de red. A solicitud de los nodos de usar ADR, el servidor realiza mediciones en la red acerca de: el contador de tramas, el SNR, y el número de GWs que han recibido transmisiones del nodo [1, 21, 22]. Cuando un nodo esté suficientemente cerca de un GW y cuenta con un buen enlace de red deberá apagar la ADR, así como usar una tasa de transferencia más alta y no utilizar el espectro más tiempo del necesario, dando espacio para que otros nodos también puedan transmitir [21].

III.2. Capa física LoRa

La capa física LoRa desarrollada por Semtech, permite comunicaciones de largo alcance, baja potencia y bajo rendimiento. Opera en las bandas ISM en el intervalo de 867-869 MHz para Europa, a +14 dBm en transmisiones de subida con canales de 125 y de 250 kHz y la misma potencia de bajada con canales de 125 kHz, con un presupuesto de enlace de 155 dB. En el caso de América, el intervalo es de 902-928 MHz con un máximo de +20 dBm (se permite hasta +30 dBm) de transmisión de subida, los canales son de 125 y de 500 kHz y +27 dBm de bajada en canal de 500 kHz, el presupuesto de enlace es de hasta 157 dB [8].

La tasa de transmisión entre nodos y GWs en LoRaWAN varía según las configuraciones de la red, las cuales van desde 0.3 Kbps hasta 50 Kbps, asegurando una buena transferencia de datos para aplicaciones del IoT con usos industriales o de comunicación entre dispositivos [3, 5, 8], no siendo factible su uso para aplicaciones que requieran mayor velocidad de transferencia, como imágenes en tiempo real. Esta baja transferencia de datos es una de las razones por las que se puede obtener un muy bajo consumo de potencia.

La carga útil de cada transmisión puede oscilar entre 11-250 bytes. La velocidad de datos puede alcanzar hasta 50 Kbps y estos parámetros dependen de las regiones. Para la banda ISM 902-928 MHz (América) la carga útil se encuentra entre los 11-222 bytes y las velocidades de transmisión varían entre 980 bps a 21.9 kbps de acuerdo al SF y del ancho de banda del canal (BW, del inglés Bandwidth) [23, 24]. La modulación en LoRa se basa en la técnica espectro disperso (SS, del inglés Spread Spectrum) y utiliza una variación conocida como espectro disperso por Chirp (CSS, del inglés Chirp Spread Spec-

trum) la cual tiene seis SF (del 7 al 12) que establecen el número de bits a utilizar para codificar un símbolo. Los BW que se pueden utilizar son: 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. Actualmente se utiliza también el espectro disperso por salto de frecuencia de largo alcance (LR-FHSS, del inglés Long Range Frequency Hopping Spread Spectrum), con dos nuevas tasas de datos (162 y 325 bps) exclusivamente para el envío de datos, mientras que para la recepción sigue siendo CSS [24].

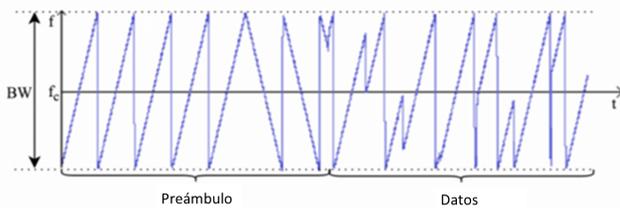


Figura 5: Espectro de un paquete LoRa [25].

Por estas características y sus posibles combinaciones, la resistencia a las interferencias y al desvanecimiento multitrayectoria aumentan. Los ajustes de SF y BW intercambian la velocidad de transferencia de datos por la distancia de transmisión, un mayor SF incrementará la distancia a la que puede transmitir, en consecuencia, se reducirá la tasa de transferencia y el tamaño de la carga útil [20, 26].

III.2.1. Chirps

Existen dos tipos de chirps en LoRa: el upchirp que inicia con la frecuencia mínima $f_{min} = \frac{-BW}{2}$ y termina con la frecuencia máxima $f_{max} = \frac{+BW}{2}$; el downchirp inicia con $f_{max} = \frac{+BW}{2}$ y termina con $f_{min} = \frac{-BW}{2}$ [1]. El espectro del paquete LoRa se observa en la Fig. 5.

El ancho de banda y el factor de esparcimiento son constantes para una trama, el SF deberá ser el mismo para el emisor y receptor. Los diferentes SF son ortogonales entre ellos lo que permite reutilizar un mismo canal para más nodos de manera simultánea variando el SF. Dado que hay 2^{SF} chirps en un símbolo, un símbolo puede codificar SF bits de información (ver Tabla 1) [5, 26, 25].

LoRa incluye una técnica de corrección de errores (FEC, del inglés Forward Error Correction), con la cual se incrementa la tolerancia al ruido y a la interferencia. La tasa de código (CR, del inglés Code Rate) es igual a $\frac{4}{(4+n)}$, donde n toma valores del 1 al 4, aunque el valor 0 indicaría que no se use FEC [1, 26, 25]. Con los datos anteriores

Tabla 1: Factores de esparcimiento y longitud de Chirp.

Factor de esparcimiento (SF)	Longitud de Chirp (Bytes)
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

puede observarse la siguiente ecuación [25] donde R_b es la tasa de datos en bps:

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR$$

Se observa que al incrementar el SF se traduce en un decremento en la tasa de datos y que esto incrementa el alcance de la transmisión [1]. El incremento del BW aumenta la tasa de datos, es decir, disminuye el tiempo en el aire de la señal [4, 26]. Los ajustes de estos parámetros se reflejan en la sensibilidad del receptor a la señal que se transmite.

III.2.2. Formato de trama física

La estructura de trama LoRa se compone de tres campos: el preámbulo, el encabezado y la carga útil (ver Fig. 6). El campo de comprobación por redundancia cíclica (CRC, del inglés Cyclic Redundancy Check) es opcional. El preámbulo se utiliza para sincronizar el receptor y transmisor [26]. La duración total del preámbulo se puede configurar entre 10.25 y 65,539.25 símbolos [25] pero los primeros cuatro son fijos y el resto programable (ver en la Fig. 7). A su vez el preámbulo comienza con una secuencia de upchirps constantes y programables que cubren toda la banda de frecuencia y ayudan a identificar el inicio de la trama. Seguido a los primeros cuatro upchirps están los últimos dos chirps que modulan valores opuestos y que codifican la palabra de sincronización, estos permiten la sincronización de la trama y también distinguir entre dispositivos de distintas redes [1].

La palabra de sincronización está formada por un byte que se usa para diferenciar las redes LoRa que usan las mismas bandas de frecuencia [1]. Un dispositivo configurado con una palabra de sincronización dada, dejaría de escuchar una transmisión si la palabra de sincronización decodificada no coincide con su configuración. La palabra de sincronización es seguida por dos downchirps [25], que se usan para sincronizar la frecuencia y el 0.25 downchirp servirá para sincronizar el tiempo en el receptor [1].

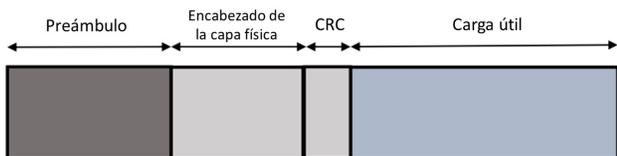


Figura 6: Estructura de la trama LoRa [1].

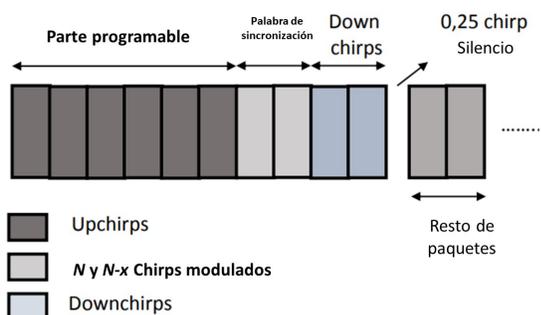


Figura 7: Estructura del preámbulo [1].

IV. Comparativa entre Gateways comerciales

La necesidad de conectar sensores ubicados a largas distancias, zonas rurales o porque se trata de una gran cantidad de estos y se debe acceder a ellos desde la nube, ha llevado al mercado a desarrollar distintas soluciones de GWs, algunas de estas se describen en la Tabla 2. En dicha tabla se observan modelos de GWs para uso en interiores, cabe señalar que la mayoría de los GWs son para uso en exteriores y cuentan con estándares de sellado y resistencia a la intemperie que van desde el IP65 al IP67. Otra característica común es que los chipsets LoRa que utilizan dan la garantía de uso del protocolo LoRaWAN para escuchar hasta 8 canales de manera simultánea. Los GWs comparten una interfaz mínima para subir los datos al servidor de red a través de Ethernet, sin embargo, la mayoría garantiza el uso de WiFi y algunos pocos cuentan con módulo previamente incorporado u opcional para hacer uso de red celular.

Se observa que las distancias que cubren en la transferencia de datos van desde los 10 km a los 15 km si se garantiza la línea de vista, mientras que en zonas urbanas con obstáculos en la comunicación, algunos modelos pueden obtener hasta 1 km, mientras que otros pueden

llegar hasta 5 km.

Tabla 2: Comparativa entre Gateways comerciales.

Nombre	Sensibilidad del receptor	Potencia	Alcance
The Things Indoor Gateway [27]	-135 dBm	+27 dBm	N/A
Sentrius™ RG1xx LoRaWAN Gateway [28]	N/A	+27 dBm	Aprox. 16 km
The Things Gateway [29]	N/A	N/A	Hasta 10 km
Kerlink iBTS [30]	-141 dBm	de 5 a 30 dBm	Más de 15 km en zonas rurales y 2 km en zonas urbanas
MultiTech Conduit US915 [31]	N/A	+27 dBm	Aprox. 16 km en zonas rurales y 5 km en zonas urbanas
Lorix One [32]	-135 dBm	+27 dBm	Aprox. 10 km en zonas rurales y 1 km en zonas urbanas
Cisco Wireless Gateway for LoRaWAN [33]	Hasta -139.5 dBm	Hasta +30 dBm con antena de 5 dBi de ganancia	N/A
Gemtek LoRa Outdoor Micro Gateway [34]	-142 dBm	+27 dBm	Más de 15 km
KONA Macro IoT Gateway [35]	-142 dBm	+27 dBm	N/A
UG 67 Outdoor LoRaWAN Gateway [36]	-135 dBm	+27 dBm	15 km en zonas rurales
Microtik wAP LR8/LR9 kit [37]	-137 dBm	+23 dBm	15 km en zonas rurales y 2 km en zonas urbanas (con antena 6.5 dBi)
Dragino LIG16 Indoor Gateway [38]	-141 dBm	+25 dBm	N/A
Dragino DLOS8 Outdoor Gateway [39]	-140 dBm	+27 dBm	N/A

V. Conclusiones

La arquitectura LoRaWAN es una solución a los proyectos de conectividad de largo alcance a muy bajo costo, es por ello que en el mercado se encuentran distintas opciones de Gateways capaces de satisfacer necesidades de usuarios que requieren el despliegue de redes de sensores, tanto en zonas urbanas como en zonas rurales, ya sea para el envío de datos de sensores en movimiento, fijos o bien de industrias, que requieren lecturas de cientos o miles de sensores, ubicados a distancias lejanas entre ellos o en lugares de difícil acceso para las personas o bien porque la toma de lectura es un costo que se reduce drásticamente al automatizarla.

Agradecimientos

Los autores agradecen a sus respectivas instituciones: Tecnológico Nacional de México campus La Paz, Universidad Autónoma de Zacatecas, Universidad de Colima y Universidad Autónoma de San Luis Potosí por los apoyos recibidos para realizar esta investigación.

Referencias

- [1] Jetmir Haxhibeqiri y col. «A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application». En: *Sensors* 18.11 (2018). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18113995. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3995>.
- [2] Alireza Zourmand y col. «Internet of Things (IoT) using LoRa technology». En: *2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*. 2019, págs. 324-330. DOI: 10.1109/I2CACIS.2019.8825008.
- [3] Alexandru Lavric y Valentin Popa. «LoRa™ wide-area networks from an Internet of Things perspective». En: *2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*. 2017, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ECAI.2017.8166397.
- [4] Alexandru Lavric y Valentin Popa. «A LoRaWAN: Long range wide area networks study». En: *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*. 2017, págs. 417-420. DOI: 10.1109/SIELMEN.2017.8123360.
- [5] Alexandru Lavric y Valentin Popa. «Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey». En: *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*. 2017, págs. 1-5. DOI: 10.1109/ISSCS.2017.8034915.
- [6] Semtech. *What Is LoRa?* URL: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.
- [7] Alexandru Lavric y Valentin Popa. «Performance Evaluation of LoRaWAN Communication Scalability in Large-Scale Wireless Sensor Networks». En: *Wireless Communications and Mobile Computing 2018 (2018)*. ISSN: 1530-8669. DOI: 10.1155/2018/6730719. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/6730719>.
- [8] LoRa Alliance. *What Is LoRaWAN*. URL: <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>.
- [9] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei y Seung-Hoon Hwang. «A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT». En: *ICT Express* 3.1 (2017), págs. 14-21. ISSN: 2405-9595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.03.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>.
- [10] Xihai Zhang y col. «A Low-Power Wide-Area Network Information Monitoring System by Combining NB-IoT and LoRa». En: *IEEE Internet of Things Journal* 6.1 (2019), págs. 590-598. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2847702.
- [11] A. Cano-Ortega y F. Sánchez-Sutil. «Monitoring of the Efficiency and Conditions of Induction Motor Operations by Smart Meter Prototype Based on a LoRa Wireless Network». En: *Electronics* 8.9 (2019). ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics8091040. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/9/1040>.
- [12] Ekkarat Boonchieng, Anukit Saokaew y Oran Chieochan. «The Prototype of the Integration between Low Cost Single Private LoRa Gateway and Public AIS NB-IOT». En: *Journal of Internet Technology* 20 (dic. de 2020), págs. 1317-1326. DOI: 10.3966/160792642019072004030.
- [13] Congduc Pham y col. «Low-cost antenna technology for LPWAN IoT in rural applications». En: *2017 7th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI)*. 2017, págs. 121-126. DOI: 10.1109/IWASI.2017.7974231.
- [14] M. Talha Buyukakkaslar y col. «LoRaWAN as an e-Health Communication Technology». En: *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*. Vol. 2. 2017, págs. 310-313. DOI: 10.1109/COMPSAC.2017.162.

- [15] Yu-Shang Chou y col. «i-Car system: A LoRa-based low power wide area networks vehicle diagnostic system for driving safety». En: *2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI)*. 2017, págs. 789-791. DOI: 10.1109/ICASI.2017.7988549.
- [16] Nur Hayati y Muhammad Suryanegara. «The IoT LoRa system design for tracking and monitoring patient with mental disorder». En: *2017 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat)*. 2017, págs. 135-139. DOI: 10.1109/COMNETSAT.2017.8263587.
- [17] Ruhaizan Fazren Ashraff Mohd Nor, Fadhlán H. K. Zaman y Shamry Mubdi. «Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN». En: *2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*. 2017, págs. 132-137. DOI: 10.1109/ICSGRC.2017.8070582.
- [18] Manuel Castro-Espinoza y col. «Red de comunicación para mensajería sin cobertura de Internet o red móvil a través de dispositivos móviles». En: *JDifu100ci@, Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías* 13 (dic. de 2019), págs. 2-8. ISSN: 2007-3585. URL: <http://difu100cia.uaz.edu.mx/index.php/difuciencia/article/view/15>.
- [19] Jonathan Reyes-Gracia y col. En: *Diseño de un Gateway Lora/WiFi como punto de acceso a una red de largo alcance para mensajería de texto*. Mayo de 2020, págs. 191-197. ISBN: 978-607-98174-6-6. URL: <http://difu100cia.uaz.edu.mx/index.php/difuciencia/article/view/15>.
- [20] Andrew J Wixted y col. «Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks». En: *2016 IEEE SENSORS*. 2016, págs. 1-3. DOI: 10.1109/ICSENS.2016.7808712.
- [21] Mehmet Ali Ertürk y col. «A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies». En: *Future Internet* 11.10 (2019). ISSN: 1999-5903. DOI: 10.3390/fi11100216. URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/11/10/216>.
- [22] The Things Network. *Adaptive Data Rate*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/adaptive-data-rate/>.
- [23] The Things Network. *Frequency Plans*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequency-plans/>.
- [24] LoRa Alliance. *LoRaWAN Regional Parameters*. URL: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/rp_2-1.0.1.pdf.
- [25] Aloÿs Augustin y col. «A Study of LoRa: Long Range amp; Low Power Networks for the Internet of Things». En: *Sensors* 16.9 (2016). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s16091466. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>.
- [26] UMBER Noreen, AHCÈNE Bounceur y Laurent Clavier. «A study of LoRa low power and wide area network technology». En: *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*. 2017, págs. 1-6. DOI: 10.1109/ATSIP.2017.8075570.
- [27] The Things Network. *The Things Indoor Gateway*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/thethingsindoor/>.
- [28] Laird. *Sentrius RG1xx LoRaWAN Gateway*. URL: <https://www.lairdconnect.com/wireless-modules/lorawan-solutions/sentrius-rg1xx-lorawan-gateway-wi-fi-ethernet-optional-lte-us-only>.
- [29] The Things Network. *The Things Gateway*. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/thethingsindoor/>.
- [30] Kerlink. *Wirnet iBTS*. URL: <https://www.kerlink.com/product/wirnet-ibts/>.
- [31] MultiTech. *MultiTech Conduit*. URL: <https://www.multitech.com/brands/multiconnect-conduit>.
- [32] Wifx Sàrl. *LORIX One*. URL: <https://www.lorixone.io/>.
- [33] Cisco. *Cisco Wireless Gateway for LoRaWAN*. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/se/internet-of-things/datasheet-c78-737307.html>.
- [34] Gemtek. *LoRa Outdoor Micro Gateway*. URL: <https://www.gemteks.com/en/products/loraiot/gateway>.
- [35] TEKTELIC Communications Inc. *KONA Macro Gateway*. URL: <https://tektelic.com/catalog/kona-macro-lorawan-gateway>.
- [36] Milesight. *UG67 Outdoor LoRaWAN® Gateway*. URL: <https://www.milesight-iot.com/lorawan/gateway/ug67/>.
- [37] MikroTik. *wAP LR9 kit*. URL: https://mikrotik.com/product/wap_lr9_kit#fndtn-specifications.
- [38] DRAGINO. *LIG16 Indoor LoRaWAN Gateway*. URL: <https://www.dragino.com/products/loraiot/gateway/item/171-lig16.html>.

- [39] DRAGINO. *DLOS8 Outdoor LoRaWAN Gateway*.
URL: <https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/160-dlos8.html>.