

## Estudio Comparativo de Potencia del Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (RSSI) para la Distancia entre Nodos en Redes Inalámbricas de Sensores (WSN)

Dr. Francisco Flores-García<sup>1</sup>, Ramón Sandoval<sup>2</sup>, Dr. Héctor Moreno-Casillas<sup>3</sup>, Fernanda Álvarez-Vélez<sup>4</sup>

**Resumen:** Una forma de monitorear la situación de la contaminación del aire es a través de sistemas convencionales de monitoreo. Sin embargo, es necesario contar con una alternativa que ofrezca mayores prestaciones, tales como menor costo, portabilidad y bajo consumo de energía. Estas necesidades fueron parcialmente cubiertas con las redes inalámbricas de sensores, (WSN, “wireless sensor networks”), las cuales consisten en nodos con sensores espacialmente distribuidos. Dichos nodos son autónomos capaces de obtener datos y transmitir la información a otros. Parte fundamental del éxito de una WSN reside en la comunicación inalámbrica, relacionada con su factor Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (RSSI por sus siglas en inglés). Esta investigación tiene como objetivo un estudio comparativo entre dos dispositivos considerando la potencia RSSI contra la distancia de cobertura en dos zonas. Para las pruebas se consideró un nodo receptor y otros transmisores. Los resultados obtenidos muestran que es posible incrementar la potencia de la señal RSSI sin incorporar hardware adicional en ambos dispositivos en la WSN 1, logrando una cobertura de transmisión no mayor de 180 metros. Para la WSN 2 fue posible establecer un enlace y una transmisión de paquetes correcta hasta una longitud de 160 metros sin necesidad de incorporar antenas externas. Los resultados confirman que el rango de frecuencias Sub-1GHz a largas distancias ofrece una alternativa óptima y sólida para el amplio espectro de aplicaciones de las WSN por lo que no será difícil encontrar en un futuro cercano gran cantidad de dispositivos en este espectro.

**Palabras clave:** Red Inalámbrica de Sensores (RIS), Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (IFSR), nodos, estudio comparativo, sub-1GHz.

### *Comparative Study on the Power of the Received Signal Strength Indicator (RSSI) and the Distance Between Nodes in Wireless Sensor Networks (WSN)*

**Abstract:** A common procedure to monitor air pollution situations is through conventional monitoring systems. However, it is necessary to have an alternative that offers greater benefits, such as lower cost, portability, and low energy consumption. These needs can be met with wireless sensor networks (WSN), which consist of nodes with spatially distributed sensors. These nodes are autonomous and capable of obtaining data and transmitting the information to other nodes. A fundamental part of the success of a WSN lies in its wireless communication, which is related to the received signal strength indicator (RSSI) factor. This is a comparative study between two devices and their RSSI power as it relates to the coverage distance in two zones. A receiving node and other transmitters were utilized for the tests. The results obtained demonstrate that it is possible to increase the power of the RSSI signal without incorporating additional hardware in both devices in WSN 1, achieving a transmission coverage of no more than 180 meters. Regarding WSN 2, it was possible to establish a link and correct packet transmission up to a length of 160 meters without the need for external antennas. The results confirm that the Sub-1GHz frequency range over long distances offers an optimal and solid alternative for the wide spectrum of WSN applications; the results serve as a recommendation for the development of WSN devices and applications in the future.

**Keywords:** Wireless Sensor Network (WSN), Received Signal Strength Indicator (RSSI), nodes, comparative study, sub-1GHz.

### Introducción

El desarrollo de sistemas de monitoreo basados en redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks: WSN por sus siglas en inglés), se ha aplicado en muchos sectores con el fin de ayudar a las personas en su trabajo, reduciendo los costos y el tiempo de muestreo. Comparadas con las redes cableadas, éstas últimas presentan los

<sup>1</sup> El Dr. Francisco G. Flores García es Profesor Investigador del Tecnológico Nacional de México-Campus Laguna, Torreón, Coahuila, México, [francisco.floresgarcia@gmail.com](mailto:francisco.floresgarcia@gmail.com)

<sup>2</sup> Ramón Sandoval es alumno del programa doctoral en ciencias en ingeniería eléctrica en el Tecnológico Nacional de México-Campus Laguna, Torreón, Coahuila, México, [ramon.sandoval.rdz@gmail.com](mailto:ramon.sandoval.rdz@gmail.com) (autor correspondiente)

<sup>3</sup> El Dr. Héctor Moreno-Casillas es Profesor Investigador del Tecnológico Nacional de México-Campus Laguna, Torreón, Coahuila, México, [honerom@gmail.com](mailto:honerom@gmail.com)

<sup>4</sup> Fernanda Álvarez-Vélez es alumna del programa de maestría en ciencias en ingeniería eléctrica en el Tecnológico Nacional de México-Campus Laguna, Torreón, Coahuila, México, [honerom@gmail.com](mailto:honerom@gmail.com)

inconvenientes de tener un tamaño amplio, instalación compleja y altos costos. Actualmente existen muchas áreas donde las WSN se pueden implementar, tales como el monitoreo agrícola, en interiores, monitoreo climático y forestal (Fauzi Othmana, M. & Shazalib, K., 2012), así como aplicaciones militares y la medicina (K. Benkic et al., 2008).

Una WSN consiste en sensores espacialmente distribuidos, llamados "nodos" o "sensores", y generalmente constan de cinco componentes clave: el sensor, un microcontrolador, un transceptor, una memoria y una fuente de alimentación, (Bogue, R., 2012), y según su configuración de comunicación pueden pasar sus datos cooperativamente a través de la red inalámbrica al nodo coordinador, o también llamado maestro, y de ahí a un servidor que contenga la base de datos principal o la aplicación vinculada al monitoreo. En la Fig. 1, se muestra un ejemplo básico de una arquitectura típica de una WSN.

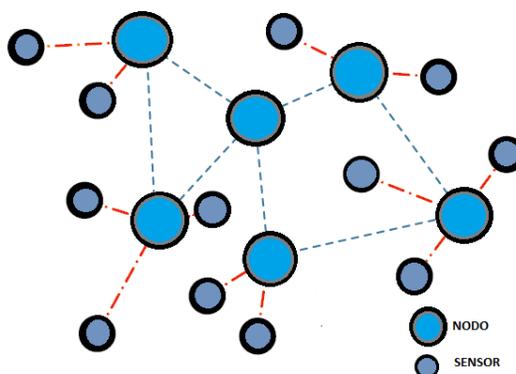


Figura 1. Red inalámbrica de sensores.

Usualmente, los nodos empleados en las WSN son tarjetas de adquisición de datos (Data Acquisition System o DAQ) que actúan como la interfaz entre una computadora y las señales físicas. La señal captada por el sensor se pasa al DAQ, el cual se encarga de transformar las señales del mundo real, tales como temperatura, presión, humedad, etc, a su interpretación o representación en señales digitales, es decir, traduce de un lenguaje a otro (JMIndustrial, 2018).

El consumo de energía de los nodos ha sido un punto crucial en el diseño e implementación de las WSN. Es conveniente que el nodo sea autónomo y debe de ser instalado de forma estratégica en la zona donde se realizará el monitoreo de las variables de interés. Optimizar la potencia de transmisión es un punto clave en el ahorro y uso eficiente de la energía del nodo, lo cual se puede lograr programando ciclos de wakeup/sleep o bien, empleando dispositivos de bajo consumo de potencia.

Como se puede apreciar, el uso de WSNs es amplio y ha llegado a adquirir importancia preponderante en aplicaciones específicas como la medicina o la milicia hasta aplicaciones comunes como la domótica, medición y control de variables ambientales. Sin embargo, un aspecto que no siempre se considera, y que no es expuesto en la literatura revisada, es la eficiencia en la transmisión de datos, así como la distancia de transmisión. En algunos casos las aplicaciones están centralizadas en áreas de cobertura pequeñas, distancias menores a 20 o 30 metros, por lo que pudiera ser despreciable este hecho, pero si consideramos que una WSN debe de ofrecer portabilidad, la distancia en la transmisión, así como la potencia de la misma, se vuelve un parámetro importante a considerar. Por lo anterior, esta investigación tiene como objetivo un estudio comparativo entre dos dispositivos comúnmente empleados en WSNs, considerando la potencia RSSI contra la distancia de cobertura, en dos zonas.

## Antecedentes

### *Dispositivos de bajo consumo de potencia*

Los dispositivos que conforman las WSN operan en una amplia gama de entornos y proporcionan ventajas en cuanto a costo, tamaño, potencia, flexibilidad e inteligencia distribuida en comparación con las soluciones convencionales de detección por cable. Estos nodos pueden cambiar de lugar y configuración, y pueden agregarse o eliminarse mientras que el funcionamiento continuo de la red sigue siendo alcanzable, (Oikonomou, P., et al., 2016).

La tecnología "Arduino" ha logrado posicionarse en un gran sector en el área de aplicaciones tecnológicas y más en las inalámbricas, en particular en las WSN, gracias a sus características de rápido prototipado, experimentado y desarrollo de diseños inalámbricos de bajo costo. Además, Arduino permite programar los conocimientos básicos de las redes de sensores inalámbricos sin tener que lidiar con herramientas muy complejas, protocolos y software avanzado. Combina la facilidad del entorno de programación, la compatibilidad con gran cantidad de periféricos, e integra redes de radio comunicación inalámbrica. Uno de estos dispositivos es la tarjeta Freakduino-900 MHz de la

empresa FreakLabs, la cual es empleada en este estudio ya que sus características la hacen muy adaptable al ambiente de prueba diseñado de la WSN, tales como poseer un circuito regulador de batería, alternar entre dos voltajes de operación 3.3V y 5V, conector de antena externa y el módulo CC1190 para alto rendimiento de aplicaciones inalámbricas.

Por otro lado, Texas Instruments en los últimos años ha desarrollado tecnología dedicada al bajo consumo energético, con eficiencia muy aceptable que hace de sus productos una alternativa muy viable en el área de las WSN y del internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés). Estos dispositivos pueden combinar tecnologías de comunicación como Wi-Fi, Bluetooth low energy (BLE), Sub-1GHz, Ethernet, Zigbee, etc, ofreciendo una alta gama de oportunidades y con ello superando ofertas de otras marcas con el mismo costo. En este estudio se empleó la tarjeta LaunchPad CC1310, dispositivo de la familia CC13xx de tecnología inalámbrica rentable y de ultra baja potencia, capaz de manejar frecuencias Sub-1 GHz, combinando flexibilidad y muy bajo consumo energético. Posee un transceptor de RF en una plataforma compatible con múltiples capas físicas y estándares con un controlador de radio dedicado, maneja comandos de bajo nivel de protocolo, lo que garantiza una potencia y flexibilidad ultrabajas sin sacrificar rendimiento y robustez.

### *Potencia RSSI*

Los métodos de localización basados en la potencia de la señal recibida (RSSI) son los más frecuentemente empleados en tecnologías WSN y Wi-Fi (Mesa et al., 2007).

El indicador RSSI en una comunicación inalámbrica permite estimar la distancia entre dos dispositivos o nodos. Una de las ventajas de usar este método es el hecho de que las medidas de RSSI se obtienen de forma directa por los módulos de radio sin la necesidad de dispositivos externos o componentes adicionales. Su unidad es el decibelio-milivatio (dBm), la cual es una unidad de potencia relativa a un milivatio (mW) utilizada para expresar la medida absoluta de potencia siendo una unidad adimensional cuyo objetivo es la cuantificación de datos (Bigelow et al., 1991).

El valor del indicador de fuerza RSSI puede describir las siguientes situaciones y su significado:

- Señal débil y con ruido regresará un bajo nivel de RSSI.
- Señal fuerte y sin ruido regresará un alto nivel de RSSI.

### *Configuración de parámetros*

En el caso de la tarjeta freakduino, el valor del indicador RSSI será un entero entre 0 a 84 que es el máximo radio que puede manejar según freaklabs sin llegar a saturarse. Para calcular los dB del valor RSSI se utiliza la siguiente fórmula:

$$P[\text{dBm}] = (\text{Valor\_base\_RSSI}) + (1.03 * \text{Nivel\_RSSI}) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$P[\text{dBm}]$  = Potencia en dBm

Valor\_base\_RSSI = -98 (modulación OQPSK a 250kbps)

Nivel\_RSSI = Nivel obtenido de la tarjeta

El valor de base se obtiene de la página oficial del fabricante y es el parámetro que se utiliza para la configuración de nodo programando el comando correspondiente en la librería y con esto entonces el máximo valor RSSI en dBm sería -11.48 dBm y -96.97 dBm. Este parámetro es el mismo para la tarjeta freakduino 900MHz V2.1a y la versión 3.0a.

La librería creada por freaklabs para la programación y configuración de la tarjeta freakduino es un fichero denominado 'chibiUsrCfg.h' la cual tiene funciones diversas que permite al usuario realizar cambios a la configuración que permitan adaptarse a la aplicación donde se implementa la tarjeta. freakduino maneja los cambios en su configuración permitida por el protocolo IEEE 802.15.4. Las tarjetas freakduino-900 V2.1a y V3.0a, trabajan con 900 MHz de frecuencia y 10 Canales para su configuración.

En el caso de la tarjeta CC1310, la configuración inalámbrica es diferente. El software SmartRF Studio es una herramienta muy versátil que se puede usar para evaluar fácilmente la radio en una etapa temprana del proceso de diseño y configurar dispositivos de RF de baja potencia de Texas Instruments. Es especialmente útil para la generación de valores de registro de configuración y comandos, y para pruebas prácticas y depuración del sistema de RF. En particular, para este estudio se empleó la siguiente configuración de comunicación:

- Frecuencia de operación: 868 MHz (sub-1GHz)
- Desviación: 5KHz

- Filtro Rx: 49 MHz
- Potencia Tx: 14 dBm (máxima potencia)
- PHY mode: SimpleLink Long-Range 5 kbps

Esta herramienta nos evita el realizar fórmulas o cálculos para configurar la comunicación inalámbrica en comparación con el dispositivo anterior, adicionalmente podemos configurar el canal de transmisión, direcciones de red, identificadores de control, etc, todo ello directamente en el archivo de configuración “smartfr\_settings.c” y “smartfr\_settings.h”.

Para la configuración de los nodos sensores que formarán las dos redes de pruebas se establecieron los siguientes criterios:

- Direcciones de red. Para el nodo coordinador se asigna la dirección 0x0001 y para los nodos sensores a partir de la dirección 0x0003.
- Identificador de red de área personal (PAN por sus siglas en inglés). Este identificador tiene una longitud de 16 bits. Todos los nodos deben configurarse con el mismo identificador PAN para que pueda establecerse un enlace con el maestro o nodo coordinador y exista una comunicación. Por default se estableció 0x1234.
- Canal. Canal 10 en la frecuencia de 686 – 915 MHz (espectro sub-1GHz).
- Máximo de carga útil de datos (Payload). Determina el tamaño más largo que puede ser transmitido en un marco o trama único. La longitud puede ser desde 1 bit a 116 bits. En este proyecto se establece una longitud máxima de 100 bits.

### Materiales y métodos

Para el desarrollo de las pruebas en las dos redes inalámbricas que forman este proyecto, se estudiaron diversas alternativas, se resumieron y concentraron en la siguiente metodología, como se presenta en la Fig. 2.

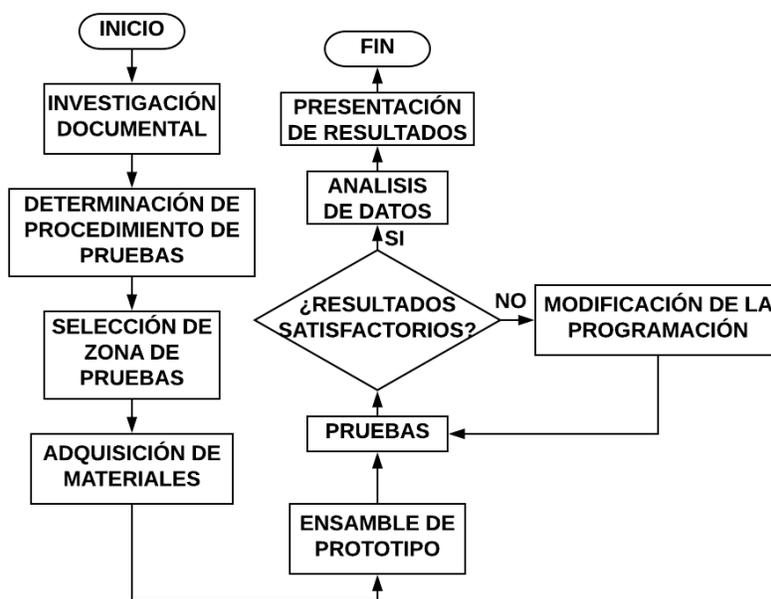


Figura 2. Metodología.

Para la medición de la propagación de la señal, se seleccionaron dos zonas de estudio un escenario externo con obstáculos: 1) el Bosque Venustiano Carranza cuyas coordenadas de ubicación son 25°32'27.2"N 103°25'58.5"W, y 2) el área dentro de la población urbana con ubicación en 25°34'24.4"N 103°24'34.7"W. En Fig. 3 y Fig. 4, se muestran las ubicaciones de los nodos y sus respectivas distancias con respecto al nodo receptor.



Figura 3. Ubicación de nodos en WSN 1.

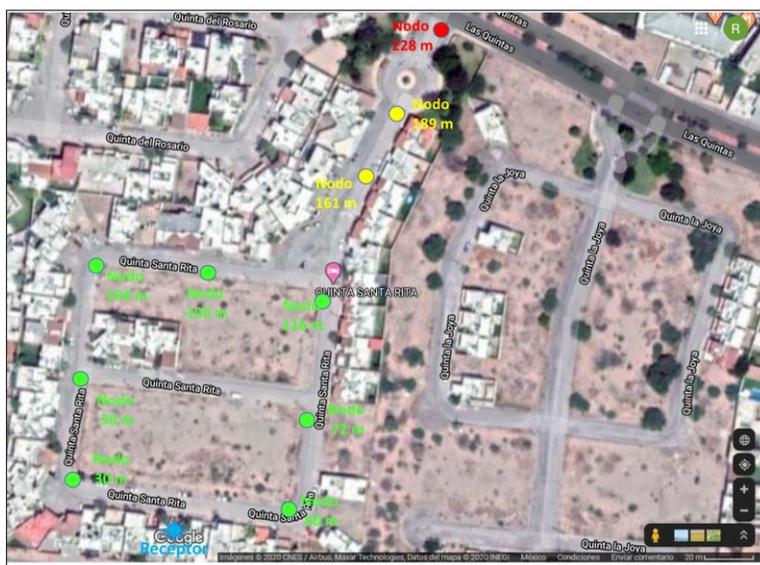


Figura 4. Ubicación de nodos en WSN 2.

Los colores de cada nodo indican la intensidad de la señal establecida entre el nodo maestro o receptor y los nodos sensores o esclavos, donde verde significa un enlace de comunicación de excelente a bueno, amarillo indica un enlace aceptable y rojo para enlaces deficientes o nulos. Las pruebas se realizaron con dos marcas de tarjetas: En el primer escenario se emplearon tarjetas freakduino 900 MHz v2.1a como nodo maestro y freakduino 900 MHz v3.0a como nodo sensor o transmisor, con circuito integrado RF AT86RF230 cuya potencia de señal va de -11.48dBm a -96.97dBm. En el segundo escenario se emplearon tarjetas de Texas Instruments CC1310 LaunchPad.

El programa diseñado para las tarjetas Freakduino se realizó en el entorno de desarrollo Arduino, teniendo en cuenta que se busca que mediante la tarjeta receptora se observe la potencia de la señal RSSI, la dirección del nodo transmisor y la lectura de sensor. Por otro lado, para programar las tarjetas de Texas Instruments se emplearon el programa Studio RF para la programación de la comunicación inalámbrica y el programa Code Composer Studio 11 para programar el resto de operaciones como la adquisición y digitalización de los datos.

Para realizar la medición de la potencia RSSI con respecto a la distancia, se utilizaron aplicaciones de geoposicionamiento con smartphones, que permitieron mediante coordenadas, tomar una lectura en metros del nodo receptor al nodo transmisor en los diferentes puntos de ubicación en cada uno de los escenarios.

En cada escenario, correspondiente a cada una de las redes inalámbricas establecidas, se emplearon diferentes distancias para realizar las pruebas: en el primer escenario las distancias fueron de 0, 30, 50, 100, 120, 150, 180 y 200

metros; en el segundo escenario las distancias fueron 30, 58, 60, 72, 100, 104, 116, 161, 189, 228 metros. En ambos casos se realizaron tres series de pruebas en cada una de las distancias y se obtuvo el promedio para cada una de las mediciones.

Como aplicación de los nodos sensores se emplearon tres diferentes sensores: sensores LM35dz y DHT11 para medir temperatura ambiente, FC-28 para humedad. La intención fue tener diferentes tipos de procesamiento de la información y su posterior transmisión para tener diversos tiempos de envío de datos y poder analizar de una mejor forma los valores RSSI obtenidos en función de la distancia.

### Pruebas y resultados

#### Pruebas de distancia con respecto a la potencia de la señal RSSI

##### a) Prueba 1

Se realizaron tres series de prueba en ambas WSN, y para cada prueba se empleó un sensor diferente. Para la WSN 1, se emplearon los parámetros de la librería estándar de la tarjeta y el sensor LM35dz. Para una secuencia de muestras tomadas por el ADC, se calcula el promedio de la temperatura, 27 °C, iniciando las pruebas a las 12:00 pm, con características meteorológicas de viento a 0 km/h, y humedad relativa de 18%.

En la Figura 5 se puede apreciar la consola del programa Arduino mostrando los datos recibidos en el nodo maestro. Los datos recibidos corresponden a la temperatura, dirección del nodo que envía el dato y valor efectivo RSSI.

```

COM9
Temperatura: 27.18, Mensaje recibido del nodo 0x3, RSSI = 0xC
RSSI dB =-12
Temperatura: 27.18, Mensaje recibido del nodo 0x3, RSSI = 0xC
RSSI dB =-12
Temperatura: 27.18, Mensaje recibido del nodo 0x3, RSSI = 0xC
RSSI dB =-12
Temperatura: 27.18, Mensaje recibido del nodo 0x3, RSSI = 0xC
RSSI dB =-12
Temperatura: 27.18, Mensaje recibido del nodo 0x3, RSSI = 0xC
RSSI dB =-12

```

Figura 5. Lecturas del sensor LM35dz en monitor serial.

En la Tabla 1 se muestran los resultados capturados por el nodo sensor 3 con los valores de la temperatura, las distancias y el RSSI entre ambos nodos. Las lecturas de temperatura presentan ligeras variaciones debido a la sombra de los arboles donde se ubicaron los nodos a ciertas las distancias.

Tabla 1. Ejemplo de resultados de la prueba con sensor de temperatura LM35dz en nodo de WSN 1.

FECHA Y HORA	DIR. NODO	SENSOR DE T.	DISTANCIA	RSSI
vie_30/09/2017 HORA:12:00:00	0X3	25.27	0	84
vie_30/09/2017 HORA:13:07:01	0x3	26.7	30	26
vie_30/09/2017 HORA:12:50:02	0X3	27.18	50	7
vie_30/09/2017 HORA:12:52:00	0X3	27.18	100	12
vie_30/09/2017 HORA:12:53:00	0X3	27.17	120	11
vie_30/09/2017 HORA:12:56:04	0X3	27.66	150	4
vie_30/09/2017 HORA:12:58:25	0x3	27.71	180	3
vie_30/09/2017 HORA:13:00:01	0X3	25.75	200	1

Para la WSN 2, se realizó el mismo procedimiento. Los datos recibidos por el nodo maestro fueron capturados por el software Smart RF y almacenados en un archivo de texto, y posteriormente fue tratada la información en Excel para una mejor representación de la información. Las condiciones meteorológicas presentes fueron las siguientes: Humedad relativa del 33%, temperatura de 32°C, y velocidad del viento de 30 Km/h. Una muestra de los datos capturados se puede apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2. Ejemplo de resultados de la prueba con sensor de temperatura LM35dz en nodo de WSN 2.

Fecha	Date	Location	Addr	Lineal Distance	Long. Pack.	Pack. Num.	Data	RSSI
9/30/2017	8:44:54 PM	A	0x003	60 m	100	36	32	-98.44
9/30/2017	8:45:48 PM	B	0x003	72 m	100	36	32	-95.89
9/30/2017	8:46:50 PM	C	0x003	116 m	100	36	32	-92.17
9/30/2017	8:47:50 PM	D	0x003	161 m	100	36	32	-106.00
9/30/2017	8:48:37 PM	E	0x003	189 m	100	36	32	-97.03
9/30/2017	8:49:52 PM	F	0x003	228 m	100	36	32	-105.40
9/30/2017	8:52:29 PM	G	0x003	100 m	100	36	32	-89.08
9/30/2017	8:54:19 PM	H	0x003	104 m	100	36	32	-99.44
9/30/2017	8:55:15 PM	I	0x003	58 m	100	36	32	-97.31
9/30/2017	8:56:25 PM	J	0x003	30 m	100	36	32	-90.58

En la Figura 6, se presenta la gráfica de RSSI vs distancia encontrada en la WSN 1 considerando el sensor LM35dz bajo una secuencia de 3 pruebas y muestreo promediado. El valor máximo fue de 84 dBm a una distancia de 0 metros entre nodos y la mínima fue de 1 dBm a 200 m de distancia. Los valores intermedios presentan variaciones debido a la presencia de obstáculos, sin embargo, se puede considerar que las lecturas obtenidas con el sensor de temperatura son confiables.

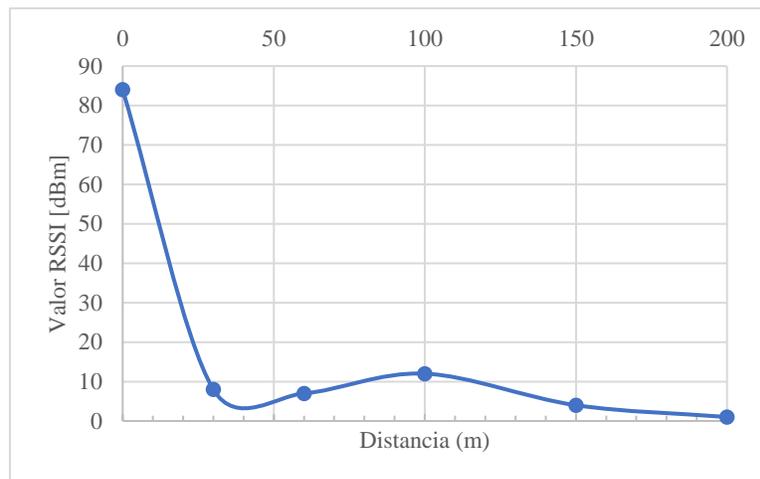


Figura 6. RSSI vs distancia en nodo de WSN 1.

Los resultados de RSSI vs distancia para la WSN 2 se pueden apreciar en la Figura 7. Los rangos de distancia de la red van desde los 30 metros hasta 228 metros. En casi todos los nodos que forman la WSN 2 se recibió el 100% de los paquetes de manera efectiva, sólo en el nodo más lejano, a 228 m, se detectaron pérdidas de paquetes. De hecho, se puede apreciar en la Figura 7 los vacíos que existen en las pruebas debido a la no recepción de los paquetes.

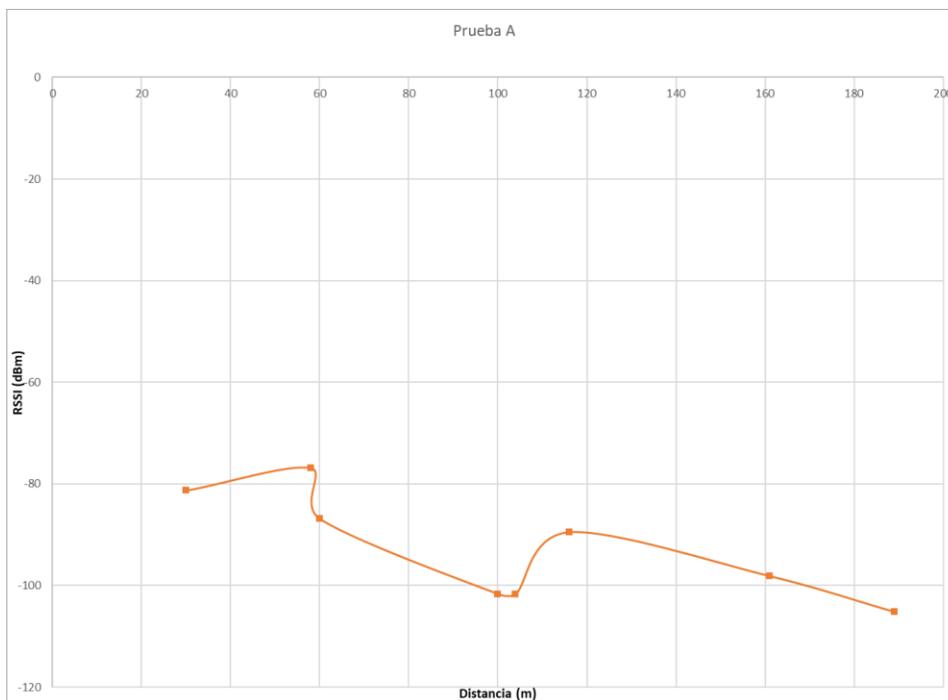


Figura 7. RSSI vs distancia en nodo de WSN 2.

En este estudio, el rango de dBm va de -85 hasta -110. En comparación con el estudio del nodo de la WSN 1, el nodo de la WSN 2 presentó más estabilidad y consistencia en el RSSI. Sin embargo, no fue posible establecer un enlace adecuado y una correcta recepción de paquetes entre maestro y nodos sensores ubicados en la distancia de 228 m.

b) Prueba 2

En la segunda prueba para la red WSN 1, se realizaron ajustes para tratar de tener un mejor alcance una mejor respuesta en el RSSI. Se consideró la temperatura de 33°C como temperatura de referencia para ser comparada con la detectada por la red. La prueba dio inicio a las 11:19 am, con viento de 11.1 Km/h, y humedad relativa de 14.8%. En esta ocasión, se empleó el sensor DHT11.

Tabla 3. Ejemplo de resultados de la prueba con sensor DHT11 en nodo de WSN 1.

FECHA Y HORA	DIR. NODO	SENSOR DE H.	SENSOR DE T.	DISTANCIA	RSSI
mar_7/11/2017 HORA:11:19:00	0x3	20%	27.00	0	84
mar_7/11/2017 HORA:11:28:00	0x3	14%	27.00	30	22
mar_7/11/2017 HORA:11:43:00	0x3	8%	33.00	50	15
mar_7/11/2017 HORA:11:52:00	0x3	11%	30.00	100	19
mar_7/11/2017 HORA:11:52:00	0x3	11%	30.00	120	17
mar_7/11/2017 HORA:13:19:00	0x3	13%	30.00	150	12
mar_7/11/2017 HORA:13:26:00	0x3	10%	30.00	180	7
mar_7/11/2017 HORA:13:27:00	0x3	10%	30.00	200	6

Los resultados de la prueba 2, mostrados en la tabla 3, indican un comportamiento similar a la primera prueba. El sensor de temperatura y humedad también mantuvo lecturas confiables en todo momento. Las variaciones de temperatura se atribuyen al ambiente (árboles que producen sobras sobre los nodos) y las variaciones de humedad presentadas son debidas al reciente riego de algunas zonas.

Por otro lado, en la WSN 2 se presentaron las siguientes condiciones meteorológicas: humedad relativa del 32%, y temperatura de 30°C con velocidad del viento de 6 Km/h. Se realizaron series de 3 pruebas con el mismo sensor, obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Ejemplo de resultados de la prueba con sensor DHT11 en nodo de WSN 2.

Fecha	Date	Location	Addr	Lineal Distance	Long. Pack.	Pack. Num.	Data	RSSI
7/11/2017	8:44:54 PM	A	0x003	60 m	100	36	30	-90.47
7/11/2017	8:45:48 PM	B	0x003	72 m	100	36	30.1	-87.72
7/11/2017	8:46:50 PM	C	0x003	116 m	100	36	30.3	-87.89
7/11/2017	8:47:50 PM	D	0x003	161 m	100	36	30.3	-98.17
7/11/2017	8:48:37 PM	E	0x003	189 m	100	36	30.5	-105.23
7/11/2017	8:49:52 PM	F	0x003	228 m	100	36	30.1	-99.58
7/11/2017	8:52:29 PM	G	0x003	100 m	100	36	31	-90.17
7/11/2017	8:54:19 PM	H	0x003	104 m	100	36	30.1	-99.56
7/11/2017	8:55:15 PM	I	0x003	58 m	100	36	30	-86.20
7/11/2017	8:56:25 PM	J	0x003	30 m	100	36	30	-89.58

Con respecto al RSSI vs distancia, en la Figura 7 se puede ver el comportamiento para un nodo en particular de la WSN 1. En esta ocasión el valor máximo fue de 84 dBm, a una distancia de 0 metros entre nodos y la mínima fue de 6 dBm a 200 m de distancia. Los valores intermedios presentan variaciones, debido a los obstáculos.

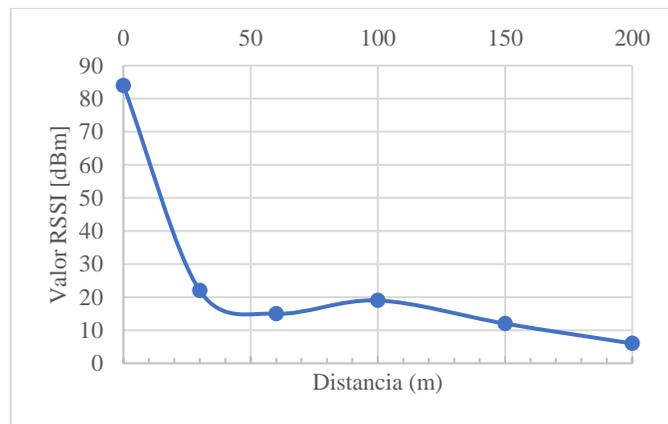


Figura 8. RSSI vs distancia en nodo de WSN 1.

Por otro lado, en la WSN 2, el comportamiento de RSSI vs distancia es mostrado en Fig. 9.

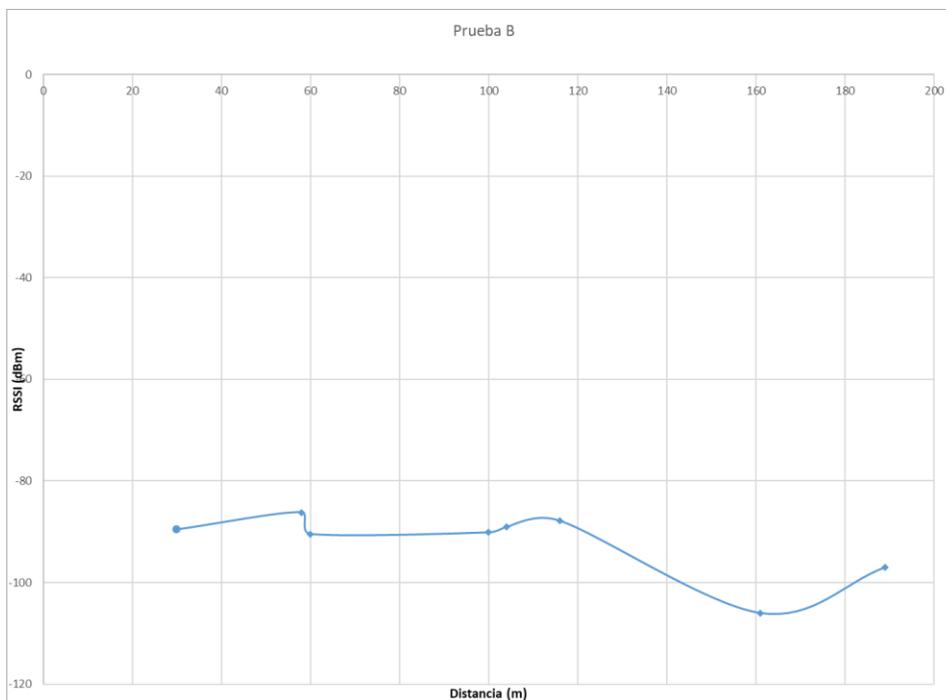


Figura 9. RSSI vs distancia para nodo de WSN 2.

c) Prueba 3

En la tercera prueba, las condiciones meteorológicas para la WSN 1 fueron: temperatura actual de 18 °C, humedad relativa 43.6% y velocidad del viento a 13 Km/h. La hora de inicio de pruebas fue a la 1:05 pm. Se usó un sensor de humedad FC-28. Además, se contempló un aumento en la resolución; de 10 bits de la tarjeta freakuino a 12 bits mediante el uso de un ADC MCP3208. Durante la fase tres se modificaron parámetros de la modulación mediante la librería de la tarjeta freakuino, definiendo el comando directo en el programa del nodo: CHB\_900\_MHz\_INIT\_MODE\_OQPSK\_SIN\_1000, para ver si existía algún aumento en la distancia de cobertura. Se realizó una investigación respecto al uso de modulación por desplazamiento de fase de dos símbolos (BPSK) para lograr incrementar el rango de la distancia, sin embargo, se presentó el inconveniente de la velocidad con que se transfieren los datos, por lo cual se decidió seguir utilizando las modulaciones de desplazamiento de fase en cuadratura escalonada (OQSPK).

Tabla 5. Ejemplo de resultados de la prueba con sensor FC-28 en nodo de WSN 1.

FECHA Y HORA	DIR. NODO	SENSOR DE H.	DISTANCIA	RSSI
mie_24/1/2018 HORA:13:5:52	0X5	39%	0	84
mie_24/1/2018 HORA:13:19:34	0X5	39%	30	36
mie_24/1/2018 HORA:13:21:59	0X5	39%	50	31
mie_24/1/2018 HORA:13:25:37	0X5	40%	100	27
mie_24/1/2018 HORA:13:28:27	0X5	40%	120	28
mie_24/1/2018 HORA:13:58:43	0X5	39%	150	29
mie_24/1/2018 HORA:13:39:26	0X5	40%	180	27

Los resultados de la tabla 5 muestran que el RSSI tiene una importante mejora con respecto a las dos primeras pruebas con recepción de datos estables en el nodo maestro. Este valor representa casi el doble de potencia y reduce las variaciones entre distancias, sin embargo, no fue posible obtener comunicación estable y transmisión segura de datos a 180 m, lo que se aprecia en Fig. 10. Además, hubo un incremento considerable en la potencia RSSI al realizar variaciones en los ajustes de configuración en las tarjetas de los nodos sensores. Para la distancia máxima en la WSN 1 de 200 metros, no fue posible establecer una comunicación eficiente, si bien se lograba realizar el enlace, se presentaban algunas pérdidas de información y retrasos al momento de la recepción de datos.

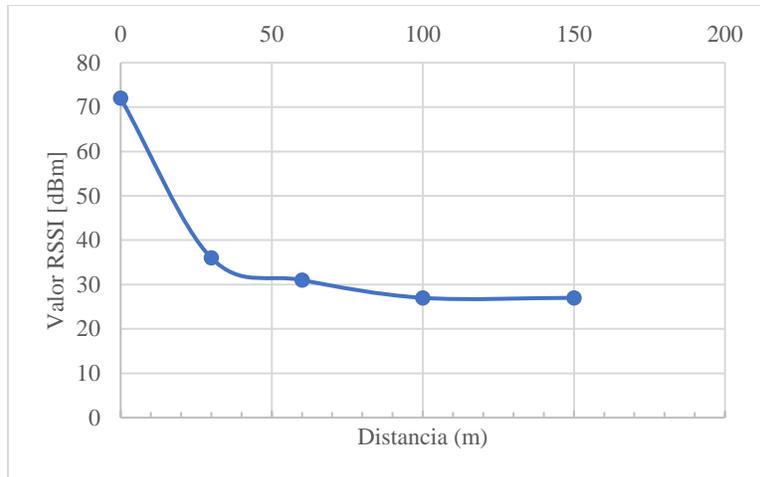


Figura 10. RSSI vs distancia en nodo de WSN 1.

Por lo que, respecta a la WSN 2, las pruebas realizadas con el mismo sensor de temperatura mostraron mediciones similares a las anteriores. Las condiciones climatológicas presentes en esta prueba fueron las siguientes: Temperatura 33°C, presión 1010 mbar, humedad al 50%, velocidad del viento de 12 Km/h. A diferencia de las pruebas anteriores, en esta última prueba se consideraron únicamente los puntos más alejados, es decir, a 100m, 104 m y 161m. En la Tabla 6 se aprecian los puntos, las mediciones y los valores RSSI promedio obtenidos.

Tabla 6. Ejemplo de mediciones obtenidas en la prueba 3 en WSN 2.

Date	Hour	Location	Addr	Lineal distance	Long. Pack.	Pack. Num.	Data	RSSI
1/24/2018	7:28 p.m.	B	0x003	100 m	100	36	0.485	-82.62
1/24/2018	7:40 p.m.	A	0x004	104 m	100	36	0.49	-90.51
1/24/2018	7:56 p.m.	C	0x005	161 m	100	36	0.51	-95.51

En la última etapa de la prueba 3 con la WSN 2, se observaron pérdidas en los paquetes enviados de los nodos más lejanos hacia el maestro. Hay una cantidad importante de paquetes perdidos (100 de 540) provenientes del último nodo: de los 440 paquetes recibidos, hubo 72 paquetes con error de redundancia cíclica (CRC) por lo que a esa distancia la efectividad del nodo es de un 81%. Los otros dos nodos presentaron comportamiento estable, y el nodo concentrador recibió todos los paquetes de forma adecuada. En la Figura 11 se aprecia el comportamiento del RSSI conforme aumentaba la distancia de transmisión entre los nodos sensores y el maestro.

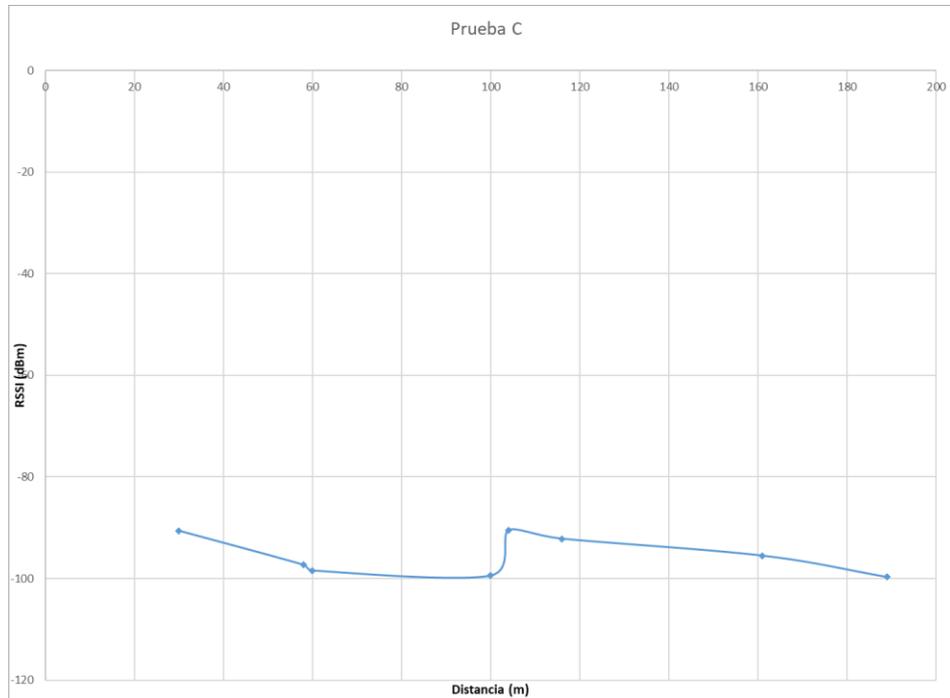


Figura 11. RSSI vs distancia en nodo de WSN 2.

En la Figura 12, se presenta la comparativa de la potencia RSSI vs distancia seleccionada para las 3 pruebas realizadas con la WSN 1.

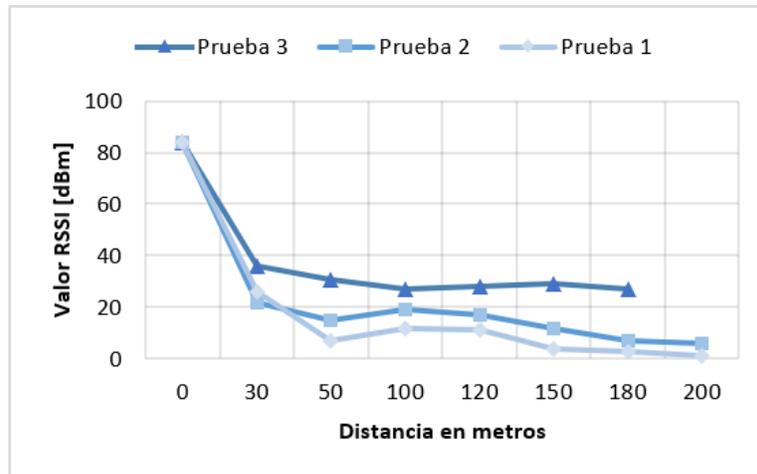


Figura 12. Resumen de las tres pruebas de RSSI vs distancia en WSN 1.

Para la WSN 2, sucedió de manera similar en la distancia de 228 metros. Si bien se establecía el enlace de manera momentánea, se presentaban muchas pérdidas de información, y algunos paquetes recibidos no contenían la información correcta. A diferencia de las tarjetas freakuino, las tarjetas CC1310 LaunchPad no requirieron de realizar ajustes en la configuración para mejorar su respuesta RSSI ya que desde el inicio se configuró el dispositivo para que trabajara a máxima potencia en la comunicación RF. En la Figura 13 se puede apreciar de forma comparativa la variación de RSSI con respecto a la distancia en las tres pruebas realizadas en la WSN 2.

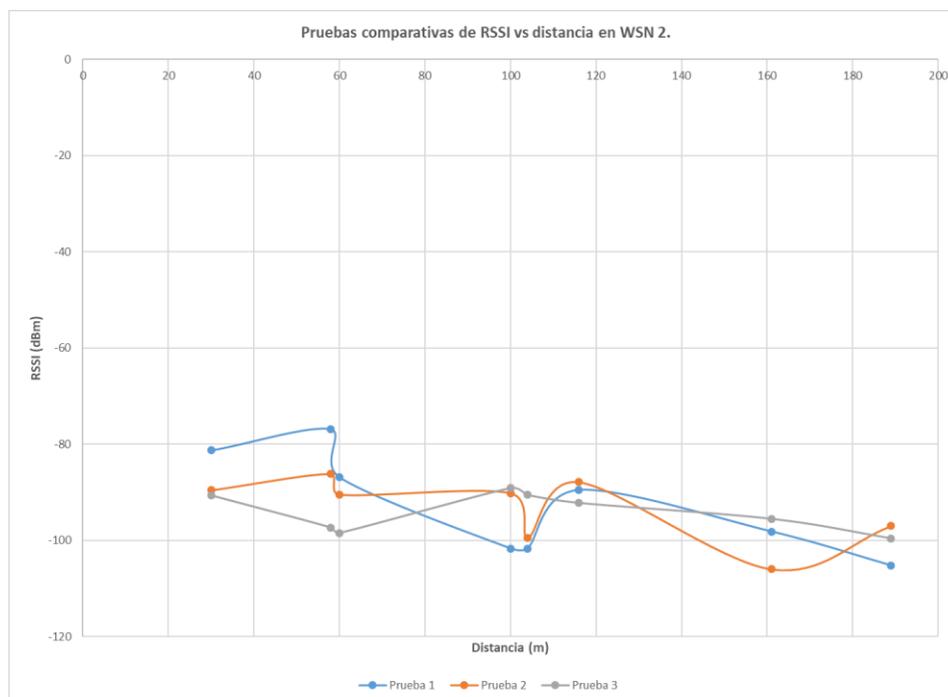


Figura 13. Pruebas realizadas en WSN 2.

Se puede apreciar que hay cierto rango de operación de RSSI en cada una de las pruebas mostrando poca variación, lo que indica cierta estabilidad en la transmisión.

Un punto importante a resaltar es que para estas pruebas la tarjeta freakuino cuenta con una antena omnidireccional externa para lograr la potencia efectiva. En el caso de la tarjeta CC1310, no se empleó ninguna antena externa, solo se empleó la antena integrada. Con respecto a las configuraciones, en cada prueba se ajustaron los parámetros de comunicación RF en la tarjeta freakuino para buscar mayor eficiencia en el enlace y transmisión de la información, no así con la tarjeta CC1310, la cual solo se configuró desde el inicio con el software SmartRF Studio.

### Conclusiones

Un estudio de potencia RSSI vs distancia fue realizado en dos zonas urbanas con obstáculos para dos WSNs con componentes tradicionales. En la mayoría de los estudios analizados no se presentan estudios o comentarios referentes a la potencia o las distancias máximas aceptables de transmisión. La intención de este estudio consistió en analizar y determinar la distancia máxima aceptable de transmisión de datos sin perder el enlace de comunicación. Como se pudo apreciar, en la zona 1 se lograron obtener transmisiones de datos a distancias de hasta 180 metros sin perder el enlace. En comparación con la zona 2, la distancia máxima aceptable fue de 160 metros. Para cada una de las pruebas realizadas se obtuvieron gráficas de potencia vs distancia. Es importante mencionar que no se agregaron dispositivos externos para aumentar la potencia, tales como antenas externas o repetidores.

Al obtener los resultados del estudio realizado, se pudo confirmar lo propuesto por Srinivasan et al. (2006), al mencionar que el valor RSSI no presenta fuertes variaciones conforme aumenta la distancia de forma proporcional. Sin embargo, esto no es el caso en las tarjetas Freakuino, ya que en ciertas condiciones sí se presentan cambios en el valor RSSI al aumentar la distancia por lo que era necesario hacer ajustes en la programación. En el caso de la tarjeta CC1310, si se valida lo propuesto ya que no fue necesario hacer ajustes en la configuración de la comunicación inalámbrica.

Se puede concluir que es posible incrementar la potencia de la señal RSSI mediante programación de parámetros de las librerías de las tarjetas Freakuino, pero con una ligera disminución del rango de cobertura de distancia. Dependiendo del tipo de aplicación, puede ser una ventaja poder contar con una señal de potencia que sea capaz de atravesar obstáculos si la distancia estratégica se ajusta a las distancias estudiadas. Por otro lado, el uso de las tarjetas de Texas Instruments ofrece cierta ventaja con respecto a las freakuino. Por un lado, el bajo consumo de potencia aun ofreciendo un RSSI adecuado con una potencia aceptable a largas distancias y el uso de la tarjeta incorporada al LaunchPad evitando la incorporación de una antena omnidireccional externa.

Para el caso de la WSN 1, se observó en algunas transmisiones interferencia debida a redes WiFi circundantes en el área de prueba. Por otro lado, en el caso de la WSN 2 no se observó efecto alguno por parte de las redes WiFi circundantes, sin embargo, un efecto nocivo presentado fue el clima. A mayor inestabilidad del viento, mayor pérdida de paquetes.

El rango de frecuencias Sub-1GHz ofrece una alternativa óptima y sólida para el amplio espectro de aplicaciones de las WSN por lo que no será difícil encontrar en un futuro cercano gran cantidad de dispositivos en este espectro.

### Limitaciones

Es importante mencionar que se presentaron limitaciones técnicas durante el desarrollo de las pruebas ya que no fue posible adquirir fuentes de alimentación de gran capacidad que nos permitieran elaborar pruebas de larga duración, tales como transmisión continua durante 24 horas, esto con la finalidad de analizar e identificar la afectación de fenómenos físicos a la transmisión, tales como temperatura, humedad, intensidad luminosa, etc. O bien, procesos antropogénicos, como la contaminación y ruido, que interfirieran de igual forma. Así mismo, al ser espacios públicos no existían las condiciones de seguridad para montar los dispositivos de forma permanente durante las pruebas.

Sería interesante realizar nuevamente la serie de pruebas, incorporando tarjetas de otras marcas para realizar un comparativo más completo y adquiriendo fuentes de energía de larga duración que permitan mantener la red instalada por un tiempo mayor a 12 horas al menos.

### Recomendaciones

Con base en el estudio realizado, es importante considerar la distancia de transmisión y la potencia RSSI en la transmisión de aplicaciones con WSNs, pues la portabilidad y la movilidad espacio-temporal son dos características importantes y destacables de este tipo de redes con respecto a las redes estacionarias tradicionales. En algunos casos, particularmente bajo condiciones meteorológicas desfavorables, se han presentado errores en la transmisión aun manteniendo una distancia relativamente cercana entre nodos, es por ello que garantizar un factor RSSI aceptable es primordial en la instalación de la WSN.

Un área de interés para futuros trabajos estaría orientada al “autoajuste” de la configuración de la potencia para la transmisión inalámbrica en el nodo, si es posible programarlo, a través de algoritmos inteligentes que permitieran ajustar dichos parámetros según las condiciones externas al nodo, o bien, la distancia al nodo receptor de forma dinámica. Así mismo, hay que considerar que el ajustar parámetros de potencia de transmisión para garantizar el enlace y la transmisión de datos, exige un mayor consumo de energía.

### Referencias

- Bigelow S, Carr J, Winder S (2001). *Understanding telephone electronics*. 4th. Ed., Newnes. Indianapolis, IN.
- Bogue, R. (2012). *Solar-powered sensors: a review of products and applications*. Emerald Insight 32 (2), 95-100. DOI: /10.1108/02602281211209374.
- DataSheet CC1190* disponible en: <http://www.alldatasheet.com/Cc1190> [Accesado el 03 mar. 2018]
- DataSheet DHT11*. Disponible en: <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf> [Accesado el 07 nov. 2017]
- DataSheet FC-28*. Disponible en: <http://www.alldatasheet.es/view.jsp?Searchword=FC-28> [Accesado el 02 ene. 2018]
- DataSheet MCP3208*. Disponible en: [www.alldatasheet.com/Mcp3208](http://www.alldatasheet.com/Mcp3208) [Accesado el 01 ene. 2018]
- DataSheet LM35dz*. Disponible en: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/520583/T11/LM35DZ/LFT1.html> [Consultado el 06 may. 2017]
- Fauzi-Othmana, M. & Shazalib, K., (2012). *Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System*. IRIS 2012 Procedia Engineering 41, 1204-1210. DOI: /10.1016/j.proeng.2012.07.302.
- Freakduino 900 MHz Wireless Arduino Compatible Board, v3.0a [*FREAKDUINO CHIBI, Open Source Wireless Sensor Networks*]. Disponible en: [http://www.freaklabsstore.com/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=187](http://www.freaklabsstore.com/index.php?main_page=product_info&products_id=187) [Accesado el 6 may. 2017]
- JMIndustrial (2018). *Tarjetas de adquisición de datos*. Manual de usuario. Disponible en: <https://www.jmi.com.mx/tarjetas-de-adquisicion-de-datos.html>.
- K. Benkic, M. Malajner, P. Planinsic and Z. Cucej (2008). *Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee*. 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, Bratislava, pp. 303-306, doi: 10.1109/IWSSIP.2008.4604427.
- Mesa López-Colmenar, J., Castañeda-Barrena, R. and Villar-Angulo, L. (2007). *Experiencia de innovación universitaria*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Instituto de Ciencias de la Educación.
- Srinivasan, K. & Levis, P. (2006). *RSSI is under Appreciated*. Proceedings of the Third Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets).

### **Notas Biográficas**

El Dr. Francisco Gerardo Flores García es profesor investigador del área de Redes inalámbricas de sensores y bioinstrumentos de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México – Campus Laguna. Actualmente es reconocido por el Sistema Nacional de Investigadores con el Nivel I. Realizó sus estudios doctorales en agroquímica por la Universidad de Perpignan, Francia. Sus áreas de interés son las redes inalámbricas de sensores, contaminación ambiental, bioinstrumentos y sistemas biomédicos.

El Dr. Héctor Moreno Casillas es profesor investigador del Departamento de Química del Tecnológico Nacional de México – Campus Laguna. Actualmente es reconocido por el Sistema Nacional de Investigadores con el Nivel I. Realizó sus estudios doctorales en la Universidad de Arizona, Estados Unidos. Su área de interés es la contaminación y propiedades de los materiales.

La alumna Fernanda Álvarez Vélez es estudiante de la especialidad de instrumentación electrónica en la maestría en ciencias en ingeniería eléctrica que ofrece la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México – Campus Laguna. Sus temas de interés son las redes inalámbricas de sensores, comunicaciones inalámbricas, sensores e instrumentos.

El alumno Ramón Sandoval es estudiante doctoral de la especialidad de instrumentación electrónica en el doctorado en ciencias en ingeniería eléctrica que ofrece la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México – Campus Laguna. Sus temas de interés son las redes inalámbricas de sensores, electrónica de potencia, inversores, sensores y modelos de dispersión.