



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de La Laguna

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**"Plataforma de simulación 3D y prototipos de nodos
para monitoreo ambiental con WSN en Torreón:
Implementación, eficiencia y problemáticas"**

POR

M. C. Jorge Ivan Galicia Reyes

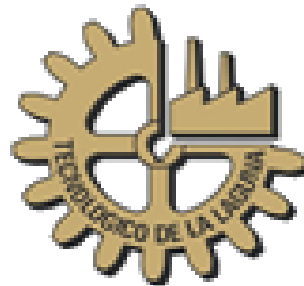
T E S I S

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Emmanuel Gómez Ramírez

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (06)-TDCIE-2022

Torreón, Coahuila. México

Septiembre 2022



Instituto Tecnológico de La Laguna

DEPTO: Div. Est. Posg. E invest.
DEPENDENCIA: DEPI/CPCIE
NO. OFICIO: DEPI/CPCIE/300/2022
ASUNTO: Autorización de Impresión
Torreón Coah., **20. SEPT. 2022**

**C. M.C. JORGE IVÁN GALICIA REYES
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE.-**

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

**“Plataforma de simulación 3D y prototipos de nodos para monitoreo ambiental con WSN en Torreón:
Implementación, eficiencia y problemáticas”**

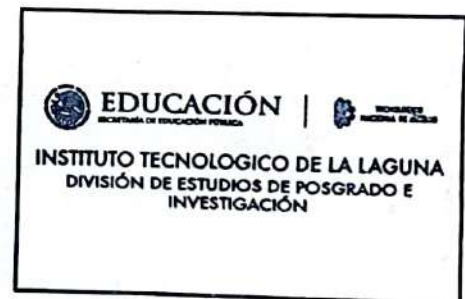
Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (06)- TDCIE.2022**, para que proceda a la impresión del mismo

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica.
Educación Tecnológica Fuente de Innovación*

**DR. JOSÉ IRVING HERNÁNDEZ JÁQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE INVESTIGACIÓN**

JIHJ/*mjsl



Torreón Coah., **15/Septiembre/2022**

DR. JOSÉ IRVING HERNÁNDEZ JACQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:


"Plataforma de simulación 3D y prototipos de nodos para monitoreo ambiental con WSN en Torreón: Implementación, eficiencia y problemáticas"

Desarrollado por el **C. Jorge Iván Galicia Reyes**, con número de control **D1813007** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN



Dr. Emmanuel Gómez Ramírez
Asesor/Director de Tesis



Dr. José Irving Hernández Jacquez
Comité Tutorial



Dr. Héctor Aurelio Moreno Casillas
Comité Tutorial



Dr. Francisco Gerardo Flores García
Comité Tutorial



Dr. Ramón Humberto Sandoval Rodríguez
Comité Tutorial Externo



AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Ana Silvia por apoyarme, acompañarme y quererme en cada momento durante mis estudios de doctorado y por brindarme el mejor regalo de la vida, mi hijo Jorge Rafael.

Al Dr. Emmanuel Gómez Ramírez por brindarme la oportunidad de trabajar a su lado, por su guía, consejos, paciencia y enseñanzas brindadas.

A mi madre Silvia Reyes Herrera y a mi padre Rafael Galicia Aguilar por apoyarme en cada una de mis decisiones personales y profesionales, brindándome incondicionalmente su amor, protección, aliento, paciencia y compañía en todo momento.

A mi hermano Edgar por ser el ejemplo que siempre ha sido para mí y que siempre seguiré. Agradezco sus consejos.

A mis compañeros y profesores de posgrado, que me brindaron su apoyo para el desarrollo de esta investigación.

Al Instituto Tecnológico de la Laguna por ser el lugar en donde me forme como profesional.

Finalmente al CONACYT por el apoyo económico brindado y otorgarme la posibilidad de ser una persona mejor preparada.

RESUMEN

Trabajar con Redes Inalámbricas de Sensores (RIS) en zonas urbanas es una tarea complicada de realizar, en donde diversos factores se deben tomar en cuenta, debido a la naturaleza propia del entorno. Es aquí, en donde herramientas analíticas como los simuladores juegan un papel importante para el éxito de las redes. El objetivo de este trabajo de tesis es desarrollar y generar un entorno virtual 3D para el simulado de RIS que sea confiable, escalable, modular y robusto, para que permita dar certidumbre durante el diseño de redes. Además, para el éxito de proyectos futuros es primordial la construcción adecuada de prototipos de nodos sensores y la realización de pruebas con diferentes tipos con estos.

Se presenta el desarrollo de un entorno 3D de la ciudad de Torreón, Coahuila, México, haciendo uso del simulador de eventos discretos OMNeT++ e INET framework. La cama de simulación 3D comprende una sección de 1 km² de objetos físicos como edificaciones y vegetación, el mapa de la Comarca Lagunera y datos de elevación de la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

Se obtuvo una coincidencia del 92% y 95%, en dos casos comparativos entre RIS desplegadas y simuladas con la cama de simulación 3D bajo el estándar IEEE 802.15.4 en distancias de 25, 50 y 100 m (Caso 1) y al modo propietario de Texas Instruments Legacy Long Range (LRM) a 90, 135 y 200 m (Caso 2). Mientras que el RSSI muestra un comportamiento acorde a lo esperado, debilitándose a mayores distancias para ambos casos.

En cuanto al rango de transmisión de los prototipos de nodos, se observó una comunicación casi perfecta a distancias menores de 135 m y aun fiables hasta 200 m con el modo LRM, mientras que con el estándar IEEE 802.15.4 se tienen comunicaciones confiables a distancias menores a 50 m y máximas de 100 m con dificultades, esto si los nodos se alimentan con una fuente de energía estable y se usan antenas externas de 2 dBi de ganancia.

Se detectó el efecto negativo que tiene el ruido de fondo o interferencias en la eficiencia de una red, esto gracias a medir el ruido en 8 canales dentro de las bandas de uso libre en México, dividir los canales en frecuencias con alto y bajo ruido y comparar la eficiencia de la red expresadas en paquetes recibidos para esos canales.

La cama de simulación 3D es una herramienta confiable para simular redes con diferentes niveles de complejidad y escala, la cual facilita tener referencias visuales y permite entender el comportamiento de las RIS que se busquen diseñar. El desarrollo de esta herramienta de simulación junto a los datos arrojados por las pruebas realizadas con los prototipos de nodos sirven de apoyo y dan las bases para un proyecto extensivo, con el objetivo de monitorear la calidad de aire en la región con RIS confiables.

Palabras clave: RIS, OMNeT++, INET framework, OpenStreetMap, OsgEarth, SRTM, Simulación 3D, TI CC1350, SmartRF Studio.

ABSTRACT

Working with Wireless Sensor Networks (WSN) in urban areas is a complicated task, where various factors must be taken into account, due to the nature of the environment. This is where analytical tools such as simulators play an important role in the success of networks. The objective of this work is to develop and generate a 3D virtual environment for WSN simulation that is reliable, scalable, modular and robust, so it allows certainty during network design. In addition for the success of future projects, it is essential the proper construction of sensors nodes prototypes, and the testing of different types of sensors.

Development of a 3D environment of the city of Torreón is presented, using the discrete event simulator OMNeT++ and INET framework. The 3D simulation bed comprises a 1 km² section of physical objects such as buildings and vegetation, the map of the Comarca Lagunera and elevation data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

A coincidence of 92% and 95% was obtained in two comparative cases between RIS deployed and simulated with the 3D simulation bed under the IEEE 802.15.4 standard at distances of 25, 50 and 100 m (Case 1) and in the proprietary mode of Texas Instruments Legacy Long Range (LRM) at 90, 135 and 200 m (Case 2). While the RSSI shows a behavior as expected, weakening at greater distances for both cases.

Regarding the transmission range of the prototype nodes, an almost perfect communication was observed at distances of less than 135 m and even reliable up to 200 m with the LRM mode. While with the IEEE 802.15.4 standard, there are reliable communications at distances less than 50 m and maximum distances of 100 m, with difficulties. This, if the nodes are powered by a stable power source and external antennas with a gain of 2 dBi are used.

The negative effect that background noise or interference has on the efficiency of a network was detected due to the measuring of the noise in 8 channels within the free use bands in Mexico, dividing the channels into frequencies with high and low noise, and to the comparison of the efficiency of the network expressed in packets received for those channels.

The 3D simulation bed is a reliable tool for simulating networks with different levels of complexity and scale, which makes it easier to have visual references and allows understanding

the behavior of the WSN that is being designed. The development of this simulation tool together with the data produced by the tests carried out with the node prototypes serve as support and provide the basis for an extensive project, with the aim of monitoring air quality in the region with reliable WSN.

Keywords: WSN, OMNeT++, INET framework, OpenStreetMap, OsgEarth, SRTM, 3D simulation, TI CC1350, SmartRF Studio.

ÍNDICE GENERAL

Índice general.....	i
Índice de figuras.....	iv
Índice de tablas.....	vi
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Telecomunicaciones.....	2
1.2 Comunicaciones inalámbricas.....	3
1.3 Problemáticas en una señal de radiofrecuencia.....	4
1.4 Redes inalámbricas de sensores.....	4
1.5 Simuladores de redes inalámbricas.....	5
1.6 Entorno virtual tridimensional.....	7
1.7 Antecedentes del problema.....	7
1.8 Planteamiento del problema.....	8
1.9 Justificación.....	9
1.10 Objetivo General.....	9
1.11 Objetivos específicos.....	9
1.12 Estructura de la tesis.....	10
Capítulo 2: Cama de simulación 3D.....	11
2.1. OMNeT++.....	11
2.1.1 Estructura de OMNeT++.....	12
2.1.2 Componentes de OMNeT++.....	13
2.1.3 Ventajas y desventajas de OMNeT++.....	14
2.1.4 Funcionamiento de OMNeT++.....	15
2.2 INET framework.....	17
2.3 Entorno 2D/3D.....	18
2.3.1 OpenStreetMap.....	19
2.3.2 OpenSceneGraph.....	20
2.3.3 OsgEarth.....	21
2.4 Datos de elevación SRTM.....	27
2.4.1 Obtención de datos de elevación para cama de simulación 3D.....	29

2.5 Objetos físicos en simulación	31
2.6 Características de la plataforma de simulación y comparativa con otros simuladores.....	32
2.6.1 Redes 5G.....	33
2.6.2 Accesibilidad.....	33
2.6.3 Escalabilidad.....	33
2.6.4 Desempeño	33
2.6.5 Ciudades 2D/3D	34
Capítulo 3: Redes inalámbricas de sensores: prototipos, diseño y funcionamiento	35
3.1 Nodo Sensor	35
3.1.1 Tarjeta CC1350 LaunchPad.....	36
3.1.2 Antena Pulse Electronics W5017	37
3.1.3. Sensor de CO ₂ MG811	40
3.1.4 Prototipo de nodo sensor versión 1: Diseño y construcción	41
3.1.5 Prototipo de nodo sensor versión 2: Diseño y construcción	43
3.2 Conectividad Inalámbrica	44
3.3 Bandas de uso libre y en desuso en México.....	45
3.3.1 Segmento de frecuencias 902 MHz – 923 MHz	46
3.3.2 Segmento de frecuencias 900 MHz – 902 MHz	46
3.4 Firmware RF de los nodos sensores	46
3.5 Energía IDE	47
3.6 Aplicación LabVIEW y Generación de reportes.....	48
3.6.1 Plataforma LabVIEW	48
3.6.2 Aplicación LabVIEW.....	49
3.6.3 Sub-VI creados.....	52
Capítulo 4: Pruebas de rangos de comunicación.....	54
4.1 Parámetros de comunicación.....	54
4.1.1 Legacy Long Range	55
4.1.2 Valores de parámetros RF establecidos.....	56
4.2. Uso de archivos generados	56
4.3 Primera prueba de rango de comunicación.....	58
4.4 Despliegue de nodos para pruebas de rangos de comunicación.....	59
4.5 Fuentes de alimentación de los nodos.....	60

4.6 Datos obtenidos	60
4.7 Resultados obtenidos de las pruebas de comunicación	61
Capítulo 5: Simulación de redes inalámbricas de sensores: comparativa en rangos y eficiencia	64
5.1 Casos comparativos.....	65
5.2 Caso 1: IEEE 802.15.4	65
5.2.1 Despliegue de nodos	65
5.2.2 Parámetros IEEE 802.15.4	67
5.2.3 Proceso de simulación para caso 1	67
5.3 Caso 2: Legacy Long Range.....	73
5.3.1 Despliegue de nodos	73
5.3.2 Parámetros Long Range Mode.....	75
5.3.3 Proceso de simulación para caso 2	75
5.4 Discusión y análisis de resultados	79
Capítulo 6: Mediciones de ruido de fondo	82
6.1 Ruido de radio de fondo.....	82
6.2 Pruebas de eficiencia y RSSI medido.....	83
6.3 Medición de ruido de fondo con SmartRF studio 7	92
6.3.1 Generación de reportes para medición de ruido.....	93
6.4 Salto de frecuencia entre canales	97
6.5 Resultados de impacto de ruido de fondo en recepción de paquetes	98
Capítulo 7: Conclusiones y trabajos a futuro	102
7.1 Conclusiones.....	102
7.2 Trabajos a futuro	106
ANEXO A.....	108
ANEXO B.....	115
ANEXO C.....	117
ANEXO D.....	122
ANEXO E	124
ANEXO F	125
REFERENCIAS.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama básico de un sistema de telecomunicación inalámbrico.	3
Figura 1.2 Red Inalámbrica de Sensores.	5
Figura 2.1 Estructura de una red en OMNeT++ [17].	12
Figura 2.2 Funcionamiento de OMNeT++.	17
Figura 2.3 Estructura del entorno virtual 3D para la simulación de redes.	18
Figura 2.4 Herramientas de software para generar el entorno 2D/3D de la cama de simulación	19
Figura 2.5 Datos de escena de origen de osm consumidos por INET de la ciudad de Torreón para las simulaciones en OMNeT++	20
Figura 2.6 Editor web openstreetmap.org	22
Figura 2.7 Subir cambios a openstreetmap.org	22
Figura 2.8 Formas de edificaciones subidas a openstreetmap.org.....	23
Figura 2.9 Región seleccionada para extraer y convertir datos .osm en MyGeodata.cloud.	24
Figura 2.10 Tipo de datos a extraer en formato .shp.....	24
Figura 2.11 Obtención de archivo de salida .shp.	25
Figura 2.12 Parámetros de formas poligonales para el archivo de salida .shp.....	26
Figura 2.13 Sección de datos extraídos de osm para la generación de modelos 3D de las edificaciones. (a) Área total. (b) archivo .shp.....	27
Figura 2.14 Atributos de datos de elevación SRMT1N25W104V3.....	28
Figura 2.15 Criterio de selección de puntos del área deseada	29
Figura 2.16 SRTM 1 Arc-Second Global Data set.....	29
Figura 2.17 Entidad con ID SRMT1N25W104V3.....	30
Figura 2.18 Descargar archivo .tif.....	30
Figura 2.19 Objetos físicos durante simulación	31
Figura 2.20 Características de la cama de simulación 3D: (a) Objetos físicos, (b) Datos de elevación SRTM, (c) Despliegue de nodos.....	32
Figura 3.1 Arquitectura del nodo sensor.....	36
Figura 3.2 Tarjeta TI Launchpad CC1350.....	37
Figura 3.3 Antena Pulse Electronics W5017 y conector Murata 81-MXFR01JA1000	38
Figura 3.4 Patrón de radiación, (a) Omnidireccional, (b) Isotrópico [41].....	39
Figura 3.5 Patrón de radiación real antena Pulse Electronics W5017, (a) Plano horizontal, (b) Plano vertical [41]	40
Figura 3.6 Sensor de CO ₂ MG811	40
Figura 3.7 Caja para prototipo de nodo sensor versión 1, (a) Dimensiones, (b) Partes	41
Figura 3.8 Carcasa para sensor MG811, (a) Impresión 3D, (b) Vista de sección [39]	42
Figura 3.9 Prototipo de nodo sensor versión 1.....	42
Figura 3.10 Prototipo de nodo sensor versión 2, (a) Explosionado de componentes [6], (b) Impresión 3D	43
Figura 3.11 Prototipo de nodo versión 2, (a) Vista interior, (b) Flujo de aire (flechas verdes) y escurrimiento de agua (flechas azules).....	44

Figura 3.12 Entorno de desarrollo integrado Energía IDE.....	47
Figura 3.13 Proceso de comunicación y generación de reportes	48
Figura 3.14 Pestaña principal de la interfaz gráfica LabVIEW.....	49
Figura 3.15 Pestaña del nodo 2 en LabVIEW.....	51
Figura 3.16 Pestaña de paquetes fallidos en LabVIEW.	51
Figura 3.17 Reportes generados.	52
Figura 3.18 Sub-VI Datos-V2.....	52
Figura 3.19 Dirección de almacenamiento de reportes.....	53
Figura 4.1 SmartRF Studio, configuraciones típicas para tarjeta LaunchPad CC1350.	55
Figura 4.2 Esquema de codificación de LRM.....	56
Figura 4.3 Exportar archivos .c y .h	57
Figura 4.4 Ajustes a los archivos fuente.....	57
Figura 4.5 Sobrescribir archivos en los archivos fuente de EasyLink	58
Figura 4.6 Distancia máxima alcanzada	58
Figura 4.7 Distancias entre transmisor y receptor, (a) 90m, (b) 135m, (c) 200m.....	59
Figura 4.8 Eficiencia de las comunicaciones a diferentes distancias y alimentación.....	62
Figura 4.9 RSSI vs distancia	63
Figura 5.1 Distancias caso 1, (a) Ubicación de nodos en mapa con imagen satelital, (b) Ubicación de nodos en cama de simulación 3D.....	65
Figura 5.2 Imágenes del despliegue de nodos para el caso 1. (a) Fotografías del Concentrador, (b) Fotografías de los Nodos.....	66
Figura 5.3 Proceso de simulación caso 1: IEEE 802.15.4.....	68
Figura 5.4 Archivo.ini; escena 3D, ruido ambiental, configuraciones ambientales y físicas.....	69
Figura 5.5 Archivo .ned; parámetros y submodulos	69
Figura 5.6 Archivo.ini; posición de los nodos y tipo de movimiento	70
Figura 5.7 Parámetros de radiofrecuencia, (a) archivo.ini, (b) SmartRF.....	70
Figura 5.8 Archivo.ini; receptor y transmisor.....	71
Figura 5.9 Carpeta resultados del proyecto de simulación.....	71
Figura 5.10 Paquetes recibidos, (a) Vector, (b) Escalar.....	72
Figura 5.11 Escalar de paquetes recibidos durante simulación.....	72
Figura 5.12 Potencia de recepción.....	72
Figura 5.13 Distancias caso 2, (a) Ubicación de nodos en mapa con imagen satelital, (b) Ubicación de nodos en cama de simulación 3D.....	73
Figura 5.14 Imágenes del despliegue de nodos para el caso 1. (a) Fotografía del Concentrador, (b) Fotografías de los Nodos.....	74
Figura 5.15 Proceso de simulación caso 2: Legacy Long Range	76
Figura 5.16 Archivo .ini; escena 3D, ruido ambiental, configuraciones ambientales y físicas.....	76
Figura 5.17 Archivo .ned; parámetros y submodulos	77
Figura 5.18 Archivo .ini; posición de los nodos y tipo de movimiento	77
Figura 5.19 Parámetros de radiofrecuencia, (a) archivo.ini, (b) SmartRF.....	78
Figura 5.20 Archivo.ini; receptor y transmisor.....	78
Figura 5.21 Carpeta resultados del proyecto de simulación.....	79

Figura 5.22 Paquetes recibidos y RSSI obtenidos en RIS y simulación.....	80
Figura 6.1 Ubicación de los nodos de la red.	83
Figura 6.2 Nodo Tx1: Blvrd. Revolución, Concentrador, Nodo Tx2: Calle Niños Héroes.	83
Figura 6.3 Comportamiento de empeoramiento de RSSI detectado y disminución de paquetes recibidos.....	90
Figura 6.4 Interfaz Continuous Rx.....	92
Figura 6.5 Proceso de generación de reportes	93
Figura 6.6 Matlab Script Node [61].	94
Figura 6.7 Obtención del valor de RSSI con en Matlab.	95
Figura 6.8 Promedio de ruido de fondo en 8 canales	96
Figura 6.9 División de canales, Bloque 1: Ruido Bajo, Bloque 2: Ruido Alto.....	96
Figura 6.10 Algoritmo de comunicación de salto de frecuencia [62]	97
Figura 6.11 Porcentaje de paquetes recibidos por hora, Bloque 1, Bloque 2, 902 MHz, 912MHz.....	99
Figura 6.12 Promedio general de porcentaje de paquetes recibidos para el Bloque 1, Bloque 2, 902 MHz y 912MHz	100
Figura 6.13 Numero de paquetes perdidos y porcentaje de paquetes perdidos por canal para el bloque 1 y bloque 2.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1 Comparación entre simuladores de redes inalámbricas [10].	6
Tabla III.1 Especificaciones Antena Pulse Electronics W5017 [40]	38
Tabla III.2 Comparación entre estándares de comunicación inalámbrica [39], [43], [44].	45
Tabla IV.1 Parámetros de comunicación.....	56
Tabla IV.2 Alimentación del nodo transmisor [54], [55]	60
Tabla IV.3 Datos de rango de comunicación.....	61
Tabla V.1 Caso 1: Modo estándar IEEE 802.15.4.....	67
Tabla V.2 Caso 2: Modo Legacy Long Range.	75
Tabla VI.1 Parámetros de comunicación.....	84
Tabla VI.2 Porcentaje de paquetes recibidos y RSSI detectado en paquetes recibidos del NodoTx1 ...	85
Tabla VI.3 Porcentaje de paquetes recibidos y RSSI detectado en paquetes recibidos del NodoTx2 ...	87
Tabla VI.4 Porcentaje de paquetes recibidos y RSSI detectado en paquetes recibidos del NodoTx2, durante el confinamiento por Covid19	91
Tabla VI.5 Promedio general de porcentaje de paquetes recibidos y error	99

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En años recientes, las redes inalámbricas de sensores (RIS) se han convertido en objeto de estudio en diversos sectores, tales como lo son el monitoreo ambiental, la ciencia y tecnología, seguridad, cuidado de la salud, etc. y se conoce el potencial que tienen como una herramienta analítica. Parte primordial del éxito de las RIS es su versatilidad de usos, que inherente a su naturaleza inalámbrica son capaces de ser implementadas en gran variedad de entornos.

El despliegue de una RIS en una determinada región urbana, natural, submarina o aérea conlleva una serie de consideraciones importantes a tomar en cuenta, en donde la topografía, el entorno, los obstáculos físicos y ruido ambiental juegan un papel importante en el éxito de la red. Aunado a los desafíos técnicos de un sin fin de tecnologías que integran las RIS, hacen que el despliegue de estas conlleve un reto importante.

La adaptación de RIS y su uso en zonas urbanas se han estudiado anteriormente con diferentes fines, y que gracias a nuevas tecnologías inalámbricas han logrado expandir su campo de aplicaciones y usos [1]. Lograr comprender el funcionamiento de las RIS ha llevado a investigadores a desarrollar simuladores de código abierto con diferentes capacidades [2] en donde los criterios más relevantes en los que se centran son el modelado energético, protocolos de comunicación soportados, movilidad de nodos y escalabilidad, dejando de lado en su mayoría aspectos importantes como lo es el entorno en donde se realizan las simulaciones.

El monitoreo ambiental es un instrumento de gestión, donde se miden cambios en las variables ambientales que se asocian a la actividad urbana y productiva del lugar. En la actualidad en la región es escaso, con esfuerzos no constantes para mitigar el problema de contaminantes. El uso de RIS es una opción ideal y versátil para el monitoreo ambiental, las cuales tienen retos técnicos y de diseño que deben ser probados antes de su despliegue.

Bajo este contexto, este trabajo se centra principalmente en el desarrollo de un entorno 3D para la simulación de RIS, representativo del lugar de despliegue, en este caso una sección de la ciudad de Torreón, con características similares del entorno urbano real y con capacidades de simulación que abarquen diversas áreas de interés, que ayude en el diseño de redes inalámbricas en la región. Además, se presentan pruebas de comunicación, medición de ruido, desarrollo de prototipos de nodos sensores, los cuales son esfuerzos necesarios en el desarrollo de redes. Se abordan comparaciones entre simulaciones de redes y el despliegue de redes con los prototipos de nodos desarrollados.

1.1 Telecomunicaciones

Muchos consideran a la industria de telecomunicaciones como la industria más lucrativa del mundo. Solo en México, de acuerdo a la Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH) del 2021, realizada por el INEGI y el Instituto Federal de Telecomunicaciones, había 88.6 millones de personas usuarias de internet (75.6% de la población mayor a 6 años), se registraron 91.7 millones de personas usuarias de telefonía celular, el 37.4% de la población de seis años o más utiliza computadora y se estima que 33.4 millones de hogares cuentan al menos con un televisor, lo que significa que el 91.2% del total de hogares tiene uno en casa [3].

Si bien se conoce que es un gran negocio, las telecomunicaciones provienen de una necesidad básica de comunicación a largas distancias, que a lo largo de la historia de la humanidad ha evolucionado desde sistemas muy básicos como señas, ruidos, señales de humo hasta lenguajes complejos. La telecomunicación se puede definir simplemente como la transmisión de señales sobre largas distancias, pero bajo una interpretación más amplia se le considera telecomunicación a toda transmisión y/o emisión y recepción de señales que

representan signos, escritura, imágenes y sonidos o información de cualquier naturaleza por cable, radiofrecuencia, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos [4].

Las telecomunicaciones son y seguirán siendo una necesidad básica para la humanidad, donde siempre se busca mejorar los sistemas de comunicación, ayudando al desarrollo de una sociedad, donde una gran cantidad de tecnologías de telecomunicación funcionan como la principal fuente de información, por lo que sería muy difícil imaginar una sociedad sin telecomunicaciones y en donde siempre existirán grandes peleas por el dominio del servicio de telecomunicación [5].

1.2 Comunicaciones inalámbricas

Existen tres elementos básicos en cualquier tipo de sistema de comunicación: el transmisor, medio físico o canal de transmisión y el receptor. En donde una comunicación inalámbrica se caracteriza por no encontrarse unidos sus dos extremos por un medio de propagación físico, sino se utiliza la modulación de ondas electromagnéticas a través del aire o espacio para su transmisión [6]. En la figura 1.1, se muestra un diagrama básico de un sistema de telecomunicación inalámbrico.

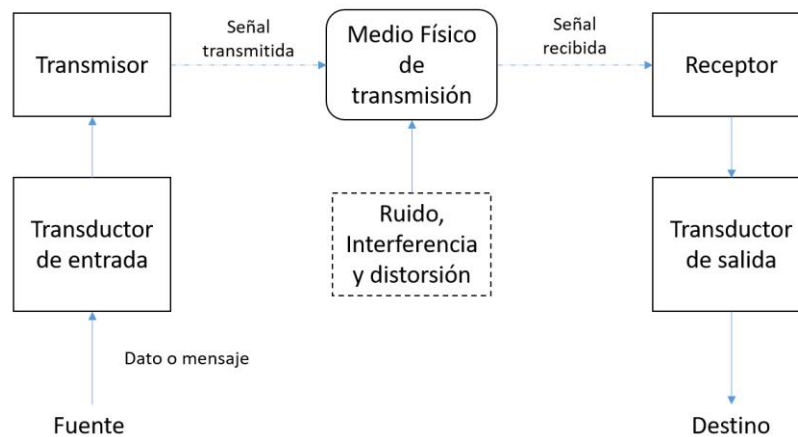


Figura 1.1. Diagrama básico de un sistema de telecomunicación inalámbrico.

El *transmisor* es el elemento con la función de enviar la información o mensaje en forma de señal, que en una comunicación inalámbrica se da en forma de radiación de ondas electromagnéticas. Para lograr una transmisión eficiente y efectiva, se deben desarrollar varias operaciones de procesamiento de la señal, como la modulación de la señal [7]. La frecuencia, la duración y la potencia se relacionan directamente con el rango de comunicación o distancia que abarca el transmisor. El *medio físico de transmisión* o *canal de transmisión* es el enlace entre el transmisor y receptor, la unión entre fuente y destino, siendo el aire este medio, donde sin importar el tipo, se caracteriza por la atenuación, la disminución progresiva de la potencia de la señal conforme aumenta la distancia, donde se verá afectado por el ruido de fondo, distorsión de la señal o interferencias de cualquier tipo. Por otra parte, la función del *receptor* es extraer del canal la señal deseada y entregarla al transductor de salida.

1.3 Problemáticas en una señal de radiofrecuencia

Existen fenómenos problemáticos que deben considerarse en cualquier comunicación, pero que se agravan en las comunicaciones inalámbricas. Estos efectos no deseados, están siempre presentes en mayor o menor medida, donde uno de ellos es la atenuación, la cual reduce la intensidad de la señal; sin embargo, la distorsión, la interferencia y el ruido de fondo son problemáticas aún más serias [7]. Es importante tener una idea de como distinguir este tipo de contaminante de la señal. La *Distorsión* es la alteración de la señal debido a la respuesta imperfecta a ella misma como por ejemplo amplitud, fase o frecuencia. La *Interferencia* es la contaminación por señales extrañas, generalmente generadas artificialmente y similar a la señal útil, algunos ejemplos de interferencia son las líneas de alta tensión, motores eléctricos, dispositivos móviles, redes inalámbricas de computadoras, señales de radio, etc. El *ruido de fondo* son señales de ruido aleatorias e impredecibles que pueden ser de tipo natural, cuando el ruido se agrega a la señal útil, esta puede quedar en gran parte oculta o eliminada totalmente.

1.4 Redes inalámbricas de sensores

El termino red de sensores inalámbricas (RIS) o Wireless Sensor Network (WSN, por sus siglas en ingles), se describe como un conjunto de nodos autónomos distribuidos espacialmente con el objetivo de medir las condiciones físicas o ambientales, como la temperatura, sonido, vibración, presión, movimiento o contaminantes, transportando sus datos

de forma cooperativa a una o varias ubicaciones principales. Las RIS se despliegan en regiones de interés en un periodo de tiempo. Si bien una red inalámbrica puede ser constituida por muy pocos nodos sensores, debido a que los nodos cuentan con cortos rangos de cobertura y cubren áreas pequeñas, típicamente una RIS contiene un número grande de nodos [8]. Estos nodos colaboran entre sí a través de una serie de saltos para mantener la conectividad y la cobertura de la red. En la figura 1.2, se muestra una representación típica de una red inalámbrica de sensores.

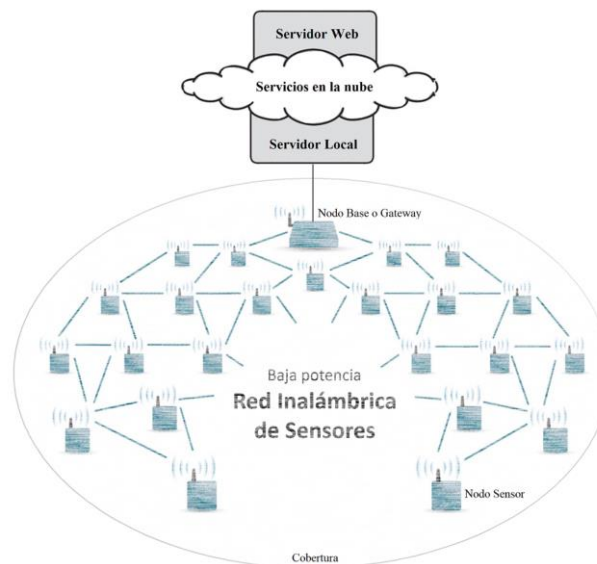


Figura 1.2. Red Inalámbrica de Sensores.

1.5 Simuladores de redes inalámbricas

Un simulador de redes es una técnica utilizada para ejecutar la red inalámbrica en la computadora y con esto, el comportamiento de la red es calculado con la ayuda de algunos cálculos matemáticos [9]. Tienen como objetivo permitir a los investigadores el diseño de una red, en la cual se pueden realizar pruebas y diagnósticos en diferentes escenarios que son de difícil acceso y resultaría costoso implementar en el mundo real.

Existen gran variedad de simuladores de redes inalámbricas. En la tabla I.1, se muestran las características, capacidades y limitaciones de algunos de los simuladores más conocidos y utilizados por los investigadores.

Tabla I.1. Comparación entre simuladores de redes inalámbricas [10].

Característica	NS2	NS3	J-Sim	OMNeT++	OPNET	QUALNET	MATLAB
Aplicabilidad	Red/sistema	Red/sistema	Red	Red/sistema	Red/sistema	Red/sistema	Sistema
Interface o lenguaje usado	C++/OTcl	Parsec (basado en C)	Java	C++/NED	C o C++	Parsec (basado en C)	C++
Disponibilidad	Modelo tradicional/sopORTE inalámbrico/sopORTE Ad-Hoc /WSN avanzadas/	Modelo tradicional/sopORTE inalámbrico/ Ad-Hoc	Modelo tradicional/sopORTE inalámbrico/ Ad-Hoc/WSN avanzadas	Modelo tradicional/sopORTE inalámbrico/ Ad-Hoc/WSN	Modelo tradicional/sopORTE inalámbrico/ Ad-Hoc/WSN	Modelo tradicional/sopORTE inalámbrico/ Ad-Hoc/WSN avanzadas	Herramientas de adquisición de datos, instrumentos de control y adquisidor de imágenes
Movilidad	Disponible	Disponible	Disponible	Disponible	Disponible	Disponible	Disponible
SopORTE Grafico	No o muy limitado	Visualización muy limitada	Visualización buena y facilidad de debugEO	Visualización buena y excelente facilidad de debugEO	Visualización excelente y excelente facilidad de debugEO	Visualización buena y excelente facilidad de debugEO	Excelente sopORTE gráfico, excelente facilidad de debugEO
Licencia	Código abierto	Código abierto	Código abierto	Gratis para uso académico y educativo	Gratis para uso académico y educativo	Comercial	Comercial
Escalabilidad	Pequeña	Grande	Pequeña	Grande	Media	Muy grande	Muy grande
Documentación y sopORTE al usuario	Excelente	Excelente	Pobre	Buena	Excelente	Buena	Excelente
Extensibilidad	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Emulación	Limitada	Limitada	Si	Limitada	No directo	Si	Si

1.6 Entorno virtual tridimensional

Un entorno virtual tridimensional es una representación espacial o modelo virtual generado por computadora. Puede tener muchas aplicaciones pero es posible clasificarlas en las siguientes categorías principales [11]:

- *Visualización y representación*, se trata del uso de entornos virtuales, con el propósito de representar y/o recrear visualmente objetos e información que permitan conocer, entender y aprender sobre algún tema o espacio en específico.
- *Simulación y Emulación*, recrea sistemas que permitan analizar y calcular el comportamiento esperado de diversos procesos de estudio.
- *Entretenimiento*, aprovecha las tecnologías de la realidad extendida y entornos virtuales con el propósito de entretener y divertir a los usuarios.

1.7 Antecedentes del problema

Torreón, ubicado al noreste de México, es una ciudad que en conjunto con ciudades vecinas y municipios de dos estados conforman la Comarca Lagunera. Región la cual es ampliamente industrializada y donde cada vez hay mayor concentración vehicular. Como en cualquier región altamente poblada, la calidad del aire se puede ver mermada y afectar la calidad de vida y salud de las personas. Según la Dirección General del Medio Ambiente de Coahuila y el Instituto De Políticas para el Transporte y Desarrollo, en la zona metropolitana de la laguna hay alrededor de 260 vehículos en circulación por cada mil habitantes y donde el 98% de emisiones contaminantes provienen de automóviles [12]. Los efectos a la salud relacionados con la contaminación atmosférica urbana están bien documentados, entre los más comunes se encuentran el aumento en el riesgo de padecer enfermedades respiratorias agudas, como la neumonía, y enfermedades crónicas, como el cáncer de pulmón y accidentes cardiovasculares. Los grupos más vulnerables son los niños, ancianos y familias de bajos recursos con acceso limitado a la asistencia médica. El tema es de vital importancia, pues se estima que nueve de cada diez personas respiran aire con altos niveles de contaminantes y cerca de 7 millones de personas mueren cada año por la exposición a las partículas finas contenidas en el aire contaminado a nivel mundial [13].

Para hacer frente a esta problemática Torreón cuenta con un total de 9 equipos manuales y una estación automática para medir la calidad de aire en partículas suspendidas totales y partículas menores a 10 micras, además de formar parte desde el año 2010 en un programa para mejorar la calidad de aire denominado Pro Aire Laguna y un sistema de Información Ambiental de la Administración Municipal 2014-2016 [14]. Sin embargo, en la actualidad esta información es vaga y de difícil acceso. Por otra parte, no hay trabajos que se centran en el desarrollo de un entorno 3D usando un simulador establecido como OMNeT++ e INET framework de una región urbana en México como el presentando en este trabajo de investigación.

1.8 Planteamiento del problema

No es posible contar con propuestas de mitigación oportunas para la reducción de contaminantes en la región si los sistemas actuales de monitoreo ambiental son escasos, poco confiables y que los datos no se pongan a disposición periódicamente. Es aquí donde el uso de una o varias RIS aportarían un sistema flexible, autoconfigurable y fácilmente escalable que permita la accesibilidad de los datos en tiempo real en diferentes puntos de interés, sin embargo, el uso de esta tecnología conlleva a tener en cuenta una gran cantidad de problemas que pueden surgir al usarla, problemáticas provenientes de su naturaleza inalámbrica como medio de transmisión, donde factores como la conectividad y cobertura son dos de los problemas fundamentales [15]. Además, factores provenientes del entorno, como obstáculos físicos, material de los objetos, temperatura ambiental, ruido de fondo, interferencias y la topografía misma del lugar de despliegue pueden afectar y tener impacto en el desempeño de una red inalámbrica, sin olvidar las características propias de los nodos sensores, con infinidad de configuraciones técnicas y parámetros preestablecidos que dictan su comportamiento. Tomando en cuenta lo anterior, el principal problema a resolver en este trabajo es: Implementar una Plataforma de Simulación 3D que tome en cuenta estos factores durante simulación y con esta herramienta ayudar al desarrollo de prototipos de nodos sensores para el monitoreo ambiental con RIS en Torreón, determinando la eficiencia de las redes y sus problemáticas.

1.9 Justificación

La motivación de este trabajo surge debido a la necesidad de obtener herramientas que permitan el diseño y despliegue de redes inalámbricas de sensores en la región. Donde se carece de este tipo de tecnologías versátiles y ampliamente adaptables a entornos urbanos.

En la actualidad, dentro del campo de las RIS, las simulaciones se han convertido en una necesidad para realizar múltiples análisis e investigaciones, que con el desarrollo de la plataforma de simulación 3D, que se presenta en este trabajo, se busca respaldar y potenciar futuros esfuerzos en el diseño de redes inalámbricas en la región.

Tener certidumbre en el funcionamiento adecuado de una RIS no solo debe sustentarse en simulaciones. Además, es necesario el desarrollo de prototipos de nodos sensores y realizar una serie de pruebas con ellos en el mundo real, que en conjunto con las simulaciones permitan un mejor entendimiento y resultados. Estos estudios permitirán tener mejores bases en el desarrollo de redes más complejas en el futuro, permitiendo mitigar la problemática de contaminación e información en la región.

1.10 Objetivo General

Desarrollar e implementar una representación geográfica 3D de la comarca lagunera para la simulación de WSN y que de soporte en el desarrollo de estas tecnologías.

1.11 Objetivos específicos

- Usar herramientas de código abierto para generar e integrar la representación geográfica 3D de la comarca lagunera a un simulador de redes establecido y bien documentado.
- Lograr cubrir una sección de la ciudad con modelos 3D de edificaciones, objetos físicos durante simulación y datos de elevación.
- Desarrollar prototipos de nodos sensores capaces de ser desplegados en zonas urbanas y representarlos en el simulador.
- Implementar configuraciones típicas inalámbricas sub-1 GHz en los prototipos de nodos sensores y en la plataforma de simulación 3D como la configuración de largo alcance Legacy Long Range de TI y el estándar IEEE 802.15.4.
- Determinar los rangos de comunicación inalámbrica aceptables para los prototipos de

- nodos sensores y comparar con datos simulados la eficiencia de la red en esos rangos.
- Poner a prueba las capacidades del simulador mediante comparaciones con redes inalámbricas de sensores desplegadas con diferentes configuraciones inalámbricas y parámetros RF.
 - Hacer mediciones de ruido de fondo en el entorno en diferentes bandas RF en desuso y de uso libre en México y analizar el posible impacto que pueda tener en la eficiencia de las redes inalámbricas de sensores.
 - Usar el algoritmo de salto de frecuencia para probar y analizar el rendimiento de la red en canales de bajo y alto ruido de fondo.

1.12 Estructura de la tesis

El capítulo 1, presenta la introducción general del trabajo, conceptos básicos, el planteamiento del problema, los antecedentes, objetivos, justificación y la estructura del documento.

En el capítulo 2, se presenta el desarrollo de la cama de simulación 3D, sus características y capacidades, así como las herramientas de software utilizadas para su creación.

En el capítulo 3, se muestra la estructura y componentes de los prototipos de nodos sensores que se usaron y desplegaron en diferentes tipos de pruebas con redes inalámbricas de sensores, así como las aplicaciones necesarias creadas para el funcionamiento de los nodos.

El capítulo 4, presenta las pruebas realizadas para obtener el rango de comunicación de los prototipos de nodos sensores.

En el capítulo 5, se presentan dos casos comparativos entre redes de sensores inalámbricas desplegadas en el instituto y sus simulaciones en la cama de simulación 3D.

En el capítulo 6, se presentan las mediciones de ruido de fondo en diferentes canales de bandas de uso libre y en desuso en México, y su impacto en la eficiencia de las redes inalámbricas de sensores.

Finalmente, en el capítulo 7, se presentan las conclusiones de la investigación y trabajos a futuro.

CAPÍTULO 2

CAMA DE SIMULACION 3D

Este capítulo describe los aspectos principales de la cama de simulación 3D, las herramientas usadas, su desarrollo y estado actual. Cuando se habla de cama de simulación 3D, se hace referencia al producto obtenido del uso de un conjunto de herramientas de software para la obtención de una representación virtual 3D de una sección de 1 km² de la ciudad de Torreón, Coahuila, México. La cual permite realizar simulaciones de redes inalámbricas y telecomunicaciones con las capacidades proporcionadas por OMNeT++, INET framework u otros simuladores compatibles como Simu5G, SimuLTE, Veins, Artery.

2.1. OMNeT++

A pesar de que OMNeT++ ha ganado popularidad como un simulador de redes dentro de la comunidad científica e industrial, en realidad OMNeT++ en sí mismo no es un simulador, más bien es una herramienta que provee un entorno de desarrollo, librerías y componentes con los cuales permite construir y desarrollar simuladores de redes, principalmente. Todo bajo un carácter modular y extensible. Una gran cantidad de modelos y motores de simulación se han escrito sobre OMNeT++ por investigadores en áreas tan diversas como el tráfico de paquetes, protocolos de internet, redes inalámbricas, redes de área local, redes per-to-per, redes ad-hoc, redes de sensores inalámbricas, redes vehiculares, redes ópticas, cloud computing, y más [16]. Bajo este paradigma modular con el que OMNeT++ se rige, se desarrolló la cama de simulación 3D, que provee la infraestructura para el desarrollo del proyecto, haciendo uso de diferentes componentes que se mencionan más adelante.

OMNeT++ ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) basado en Eclipse, un entorno de ejecución gráfico y una gran cantidad de otras herramientas, que han ganado popularidad como plataforma de simulación, formando una gran comunidad de usuarios.

2.1.1 Estructura de OMNeT++

OMNeT ++ proporciona una arquitectura basada en componentes. En el ensamble de modelados se permite hacer uso de componentes reutilizables, los módulos se pueden combinar de varias maneras, como bloques de LEGO. Los componentes (módulos) se programan en C ++, luego se ensamblan en componentes y modelos más grandes usando un lenguaje de alto nivel (NED). OMNeT ++ tiene una amplia compatibilidad en su Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés) con otras herramientas debido a su arquitectura modular, el *kernel* de simulación (y los modelos) se pueden incorporar fácilmente en otras aplicaciones y su acceso es libre.

Los módulos (simple modules) se pueden conectar entre sí a través de puertos (Gates) y combinarse para formar módulos compuestos (compound module). En la figura 2.1, se muestra una red, representada en base a la estructura general de OMNeT++.

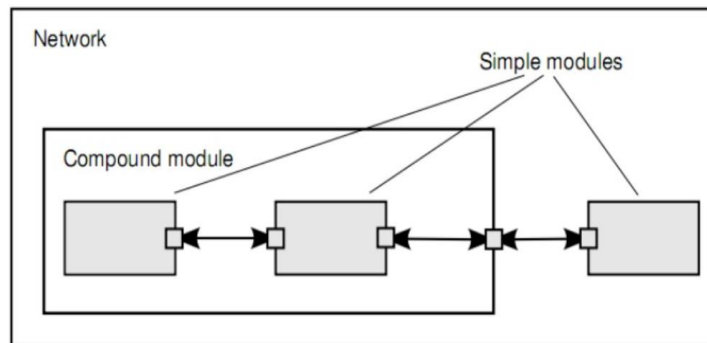


Figura 2.1. Estructura de una red en OMNeT++ [17].

Para definir el comportamiento de las simulaciones, OMNeT++ utiliza dos tipos de lenguajes: el primero es el lenguaje NED (NEtwork Description), el cual facilita al programador la descripción modular de la red, su estructura y la topología; el segundo lenguaje es C++, utilizado para la parte lógica de los proyectos.

El lenguaje NED cuenta con algunas características que permiten la escalabilidad de las redes simuladas [18], como son:

- a) **Jerarquías.** La manera tradicional de lidiar con la complejidad y por lo tanto simplificar proyectos es mediante la introducción de jerarquías, en OMNeT++ cada componente que es demasiado complejo puede ser dividido en varios módulos simples, más pequeños y ser usados como un módulo compuesto. Permitiendo un uso amigable al momento de utilizar diversos elementos en proyectos grandes.
- b) **Basado en componentes.** Los módulos simples y los módulos compuestos son reusables, lo que permite utilizarlos en cualquier otra parte de los proyectos, sin la necesidad de tener que copiar códigos. Y más importante aún, permite la creación de librerías (Como INET framework, Simu5G, MiXiM, etc.).
- c) **Interfaces.** En cada módulo simple es posible definir las conexiones que este puede tener; a su vez, cada módulo compuesto tiene las conexiones que define el módulo simple que hace la función de interfaz.
- d) **Herencia.** Los módulos y los canales pueden tener subclases. Por ser una herramienta de simulación basada en componentes se tiene la posibilidad de implementar proyectos ya realizados, y de que a su vez, estos puedan ser implementados en otros proyectos, dando la posibilidad de agregar parámetros, puertos y en caso de ser módulos compuestos, de cambiar los módulos simples por otros.
- e) **Paquetes.** El lenguaje NED presenta una estructura de paquetes como la de java, para minimizar los riesgos de conflictos entre los diferentes paquetes. Además, usa NEDPATH (similar a CLASSPATH de Java) para especificar de forma sencilla las dependencias de los módulos de simulación.

2.1.2 Componentes de OMNeT++

OMNeT++ cuenta con algunos componentes principales como:

- Compilador para la topología de descripción de lenguaje NED.
- Interfaz Gráfica de usuario (GUI) para la ejecución del simulador (Tkenv).

- Interfaz al usuario de líneas de comando de simulación ejecutada (Cmdenv).
- Herramienta de visualización escalar de graficas de resultados (Scalars).
- Herramienta de graficación por vectores de graficas de resultados (Plove).
- Herramientas de documentación de modelo (opp_neddoc).
- Documentación, simulación de muestras (ejemplos, showcases).

Ademas OMNeT++ soporta la interfaz gráfica para simulaciones y entornos virtuales como Qtenv, en donde las simulaciones de la cama de simulación 3D se ejecutan. Algunas características más importantes son [19]:

- Visualizador de redes.
- Animaciones de mensajes enviados y recibidos.
- Diversos modos de ejecución en simulaciones (evento por evento, normal, rápido, exprés).
- Las simulaciones se pueden reiniciar.
- Ejecutar hasta (un evento programado, cualquier evento en un módulo o un tiempo de simulación establecido).
- Se puede establecer una configuración/ejecución o red diferente.
- registro de flujo de mensajes
- visualización de registros de módulos de texto
- Inspectores para ver contenidos de objetos y variables en el modelo
- Registro de eventos para su posterior análisis
- Capturas de video en ventana principal
- Reportes detallados sobre el modelo: objetos, variables, etc.

2.1.3 Ventajas y desventajas de OMNeT++

Ventajas:

- Bien estructurado, altamente modular, no limitado a simulaciones de protocolo de red.
- Compatible con Windows, Mac OS y Linux.

- Bien documentado. Cuenta con IDE y gran cantidad de modelos de simulación disponibles.

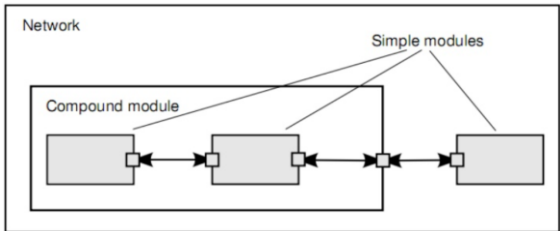
Desventajas:

- Relativamente joven comparado con otros simuladores y cuenta con menos modelos de simulación.
- Diseñado principalmente para sistemas operativos Linux, algunos plugins o frameworks solo funcionan en esta plataforma.

2.1.4 Funcionamiento de OMNeT++

El funcionamiento de OMNeT++ depende de un conjunto de módulos y componentes independientes que interactúan entre sí, cada uno con diferente propósito para el simulado de una red y programados con diferentes lenguajes de programación, en la figura 2.2 se muestra el proceso y componentes que determinan el funcionamiento de OMNeT++.

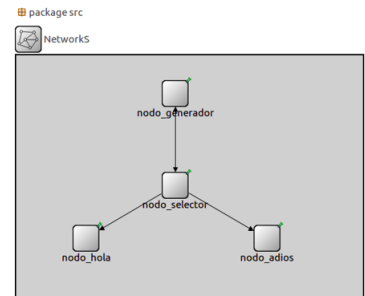
1. Un modelo en OMNeT++ es construido a partir de componentes (módulos) que se comunican intercambiando mensajes. Los módulos se pueden anidar, es decir, varios módulos se pueden agrupar para formar un módulo compuesto. Al crear el modelo, se debe asignar al sistema una jerarquía de módulos de comunicación.



2. Se define la estructura del modelo en el lenguaje NED (Network Description Language). Se puede editar NED en un editor de texto o en el editor gráfico de OMNeT++ basado en Eclipse.

```

package src;
network NetworkS
{
    @display("bgb=517,362");
    submodules:
        nodo_generador: Nodo_generador {
            @display("p=237,57");
        }
        nodo_selector: Nodo_selector {
            @display("p=237,194");
        }
        nodo_hola: Nodo_hola {
            @display("p=104,273");
        }
        nodo_adios: Nodo_adios {
            @display("p=374,273");
        }
    connections:
        nodo_generador.out --> nodo_selector.in;
        nodo_selector.out --> nodo_adios.in;
        nodo_selector.out2 --> nodo_hola.in;
        nodo_selector.out3 --> nodo_generador.in;
}
    
```



3. Los componentes activos del modelo (simple modules) se programan en C++, usando el Kernel de simulación y las librerías.

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <omnetpp.h>

using namespace omnetpp;

class Nodo_generador:public cSimpleModule
{
private:
    double time_interval;
    int random;
    int num_basura_rvcd;
protected:
    virtual void initialize();
    virtual void handleMessage(cMessage *msg);
    virtual void finish();
};

Define_Module(Nodo_generador);

void Nodo_generador::initialize()
{
    random = 0;
    time_interval= 0.1;
    num_basura_rvcd=0;
    cMessage *msg= new cMessage("");
    scheduleAt(time_interval,msg);
}
```

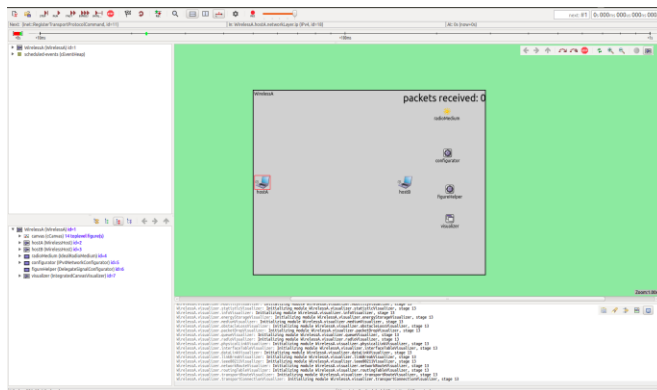
4. Los archivos .ini proporcionan la configuración y parámetros del modelo. Un archivo .ini puede describir varias ejecuciones de simulación con diferentes parámetros.

```
[Config Wireless001]
network = WirelessA
sim-time-limit = 25s

*.host*.networkLayer.arpType = "GlobalARP"
*.host*.numUdpApps = 1

*.hostA.udpApp[0].typename = "UDPBasicApp"
*.hostA.udpApp[0].destAddresses = "hostB"
*.hostA.udpApp[0].messageLength = 1000B
*.hostA.udpApp[0].sendInterval = exponential(12ms)
*.hostA.udpApp[0].packetName = "UDPdata"
*.hostA.udpApp[0].destPort = 5000
*.hostB.udpApp[0].typename = "UDPSink"
*.hostB.udpApp[0].localPort = 5000
*.host*.wlan[0].typename = "IdealWirelessNic"
*.host*.wlan[0].radio.transmitter.communicationRange = 500m
*.host*.*.bitrate = 1Mbps
```

5. Al ejecutar el programa, la red diseñada se visualiza en una interfaz gráfica la cual es interactiva.



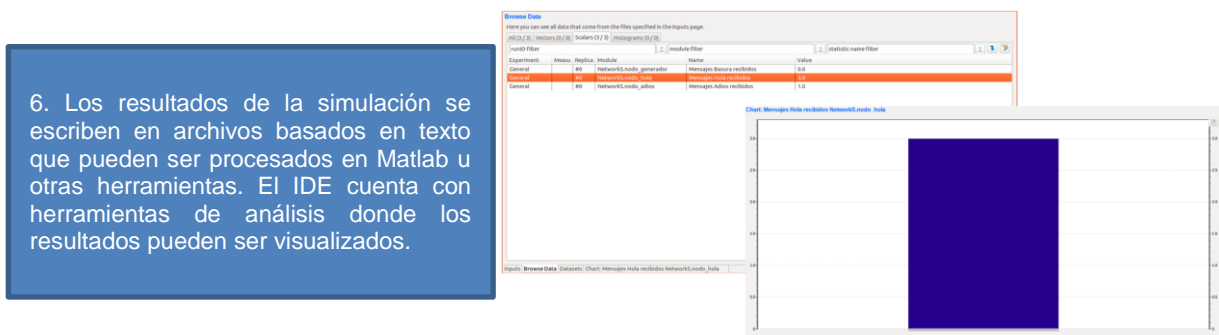


Figura 2.2. Funcionamiento de OMNeT++.

2.2 INET framework

Uno de los modelos dentro del ecosistema de OMNeT++ más ampliamente utilizado es INET framework, el cual es una librería de código abierto que provee a los investigadores de protocolos, agentes y otros modelos diseñados para la experimentación con simulación de redes de comunicación. INET Framework es uno de los más longevos y con la más grande colección de modelos de simulación para OMNeT++ [20]. INET está construido bajo el concepto de módulos que se comunican mediante mensajes, donde los protocolos de las redes son representados como componentes. INET se beneficia de la infraestructura proporcionada por OMNeT++, los modelos pueden desarrollarse, ensamblarse, parametrizarse, ejecutarse y obtener resultados de las simulaciones desde el IDE de OMNeT++ o desde la línea de comandos.

Algunas características son [20]:

- Implementación de las capas OSI (Capa física, enlace de datos, red, transporte, aplicación).
- Implementación de protocolos para varias capas.
- Soporte de redes IPv4/IPv6.
- Protocolos de la capa de transporte: TCP, UDP, SCTP.
- Protocolos de enrutamiento (ad-hoc y cableada).
- Interfaces para redes cableadas e inalámbricas (Ethernet, PPP, IEEE 802.11, etc.)

- Capa física con nivel de detalle escalable (modelos de propagación detallados, cobertura de radio, etc.).
- Amplia gama de modelos de aplicación.
- Soporte para emulación de redes.
- Soporte de movilidad.
- Soporte de modelos de objetos físicos ambientales (Obstáculos para propagación de radio).
- Soporte de visualización 2D/3D.

2.3 Entorno 2D/3D

En nuestro acercamiento al desarrollo de un entorno virtual 3D para la simulación de redes se utilizan herramientas de software de uso libre y con bajo requerimiento de procesamiento, los cuales OMNeT++ e INET framework usan para integrar el mapa 2D, el entorno virtual 3D y los datos de elevación a las simulaciones de redes. En la figura 2.3, se muestra la estructura general de las herramientas de software que se usan para generar el entorno virtual 3D dentro del simulador OMNeT++.

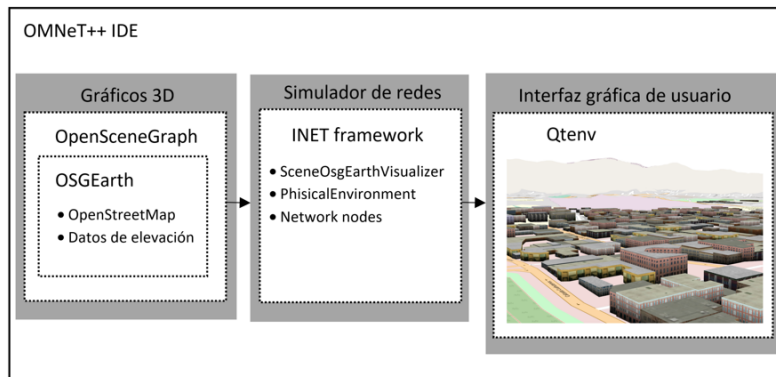


Figura 2.3. Estructura del entorno virtual 3D para la simulación de redes.

Tener un contexto del mundo real en las simulaciones es algo siempre deseable, y más si lo que se busca es representar una determinada área urbana. Para lograr este contexto tan

específico de la ciudad de Torreón se usan tres herramientas, que se encargan específicamente de generar el entorno virtual y modelado de edificaciones en el simulador, los cuales son OpenStreetMap, OpenSceneGraph y OsgEarth, que se muestran en la figura 2.4.

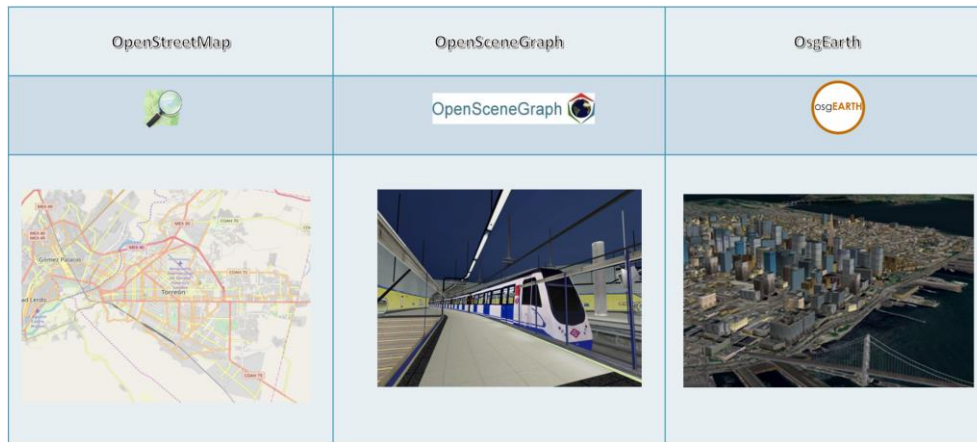


Figura 2.4. Herramientas de software para generar el entorno 2D/3D de la cama de simulación.

2.3.1 OpenStreetMap

Ofrece datos geográficos de todo el mundo de forma gratuita y se puede definir como un proyecto colaborativo para creación de mapas que pueden ser editables en cualquier momento por la comunidad. INET Framework permite mostrar datos de OpenStreetMap (OSM) en las simulaciones usando el IDE de OMNeT++ basado en eclipse bajo el entorno gráfico Qtenv. La información del área del mapa en cuestión se carga desde internet directamente de openstreetmap.org durante las simulaciones, especificando el origen de las coordenadas geográficas, mediante el uso del módulo de INET `OsgGeographicCoordinateSystem` y los parámetros `sceneLongitude` y `sceneLatitude` [21]. En la figura 2.5, se muestra el mapa cargado de OpenStreetMap para la cama de simulación 3D, que corresponde al origen de la escena durante las simulaciones, con latitud 25.542150 y longitud -103.433803.

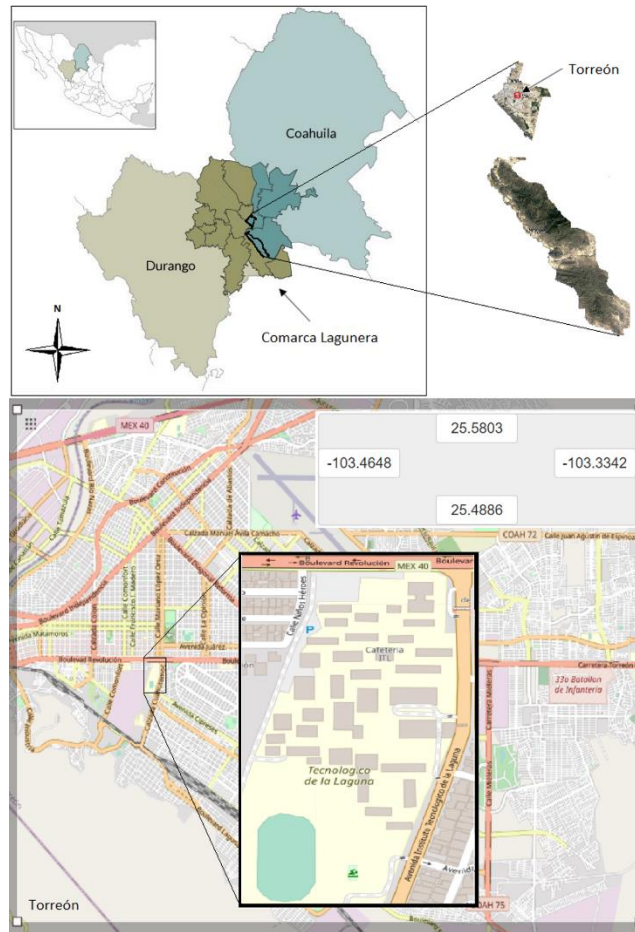


Figura 2.5. Datos de escena de origen de osm consumidos por INET de la ciudad de Torreón para las simulaciones en OMNeT++.

2.3.2 OpenSceneGraph

Se usó el motor gráfico de código abierto OpenSceneGraph para la generación de modelados 3D en la escena durante las simulaciones. OSG es usado ampliamente en campos como la realidad virtual, realidad aumentada, educación, videojuegos y visualizaciones de índole científico [22]. OpenSceneGraph está escrito en C++ estándar y usa el API OpenGL (Open Graphics Library) para la generación y renderizado 3D, permitiendo generar escenas tridimensionales complejas a partir de geometrías simples, como puntos, líneas y triángulos.

2.3.3 OsgEarth

Para desplegar el mapa y entorno virtual 3D en la interfaz gráfica de usuario Qtenv durante simulación se usa el motor de mapeado 3D y SDK geoespacial osgEarth, el cual hace uso de librerías de OpenSceneGraph para generar las escenas 3D. Se requiere un archivo .earth, un archivo XML, donde se especifica como los datos de origen se incorporan dentro del mapa y especifica cómo establecer los datos consumidos generalmente desde internet. Las ubicaciones en el mapa se identifican con coordenadas geográficas, como longitud y latitud. OsgEarth permite visualizar datos de elevación, entidades vectoriales y cantidades masivas de imágenes dentro del mapeado. La forma como osgEarth organiza los datos es mediante un paradigma Mapa/capa, el mapa comprende una colección de capas, que renderiza una sobre otra, desde la capa inferior hasta la superior, logrando formar una escena final [23]. Como primer capa en el archivo .earth se establecen los datos provenientes de Openstreetmap, por internet como se observó anteriormente en la figura 2.4, lo que permite tener a disposición para las simulaciones un entorno 2D donde fácilmente se obtenga cualquier calle, ubicación y distancias muy aproximadas a la realidad. La siguiente capa corresponde a la generación de los modelos 3D de los edificios, esto se logra con el uso de un archivo .shp, el cual es un formato vectorial de almacenamiento digital utilizado para almacenar la ubicación de los elementos geográficos y los atributos que estén asociados a ellos, atributos que osgEarth interpreta para generar las formas 3D.

Openstreetmap cuenta con un editor que permite delimitar áreas con la ayuda de fotografías satelitales, donde se generan las formas y atributos con las que contara el archivo .shp, como se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6. Editor web openstreetmap.org.

Atributos como posición geográfica, forma, tipo de edificio, cantidad de pisos y altura se establecen a través del editor web. Las ediciones pueden ser realizadas por cualquier persona con una cuenta de openstreetmap y quedarán almacenadas en sus servidores una vez que se guarden los cambios como se muestra en la figura 2.7 y podrán ser visibles por otros usuarios.

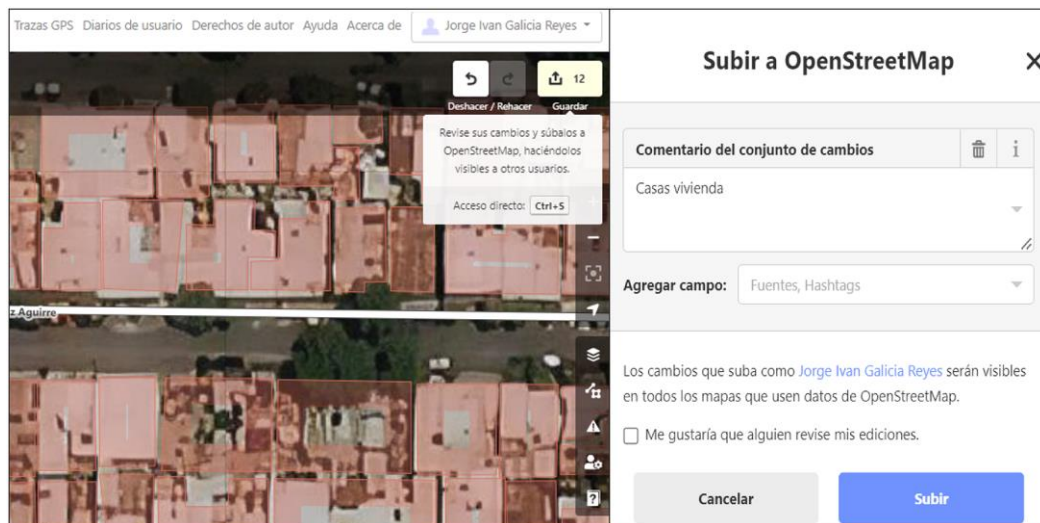


Figura 2.7. Subir cambios a openstreetmap.org.

Las formas de las edificaciones son revisables y editables por otros usuarios al pasar de unas horas y se podrán observar como cambios establecidos una vez que desde la página principal de openstreetmap se observan las formas antes editadas (en color marrón) sin entrar a la página de edición, las formas se observen al hacer zoom como se observa en la figura 2.8.



Figura 2.8. Formas de edificaciones subidas a openstreetmap.org.

El archivo .shp se extrae del archivo .osm con herramientas web como BBBike.org o Mygeodata.cloud, este último es una herramienta online que permite descargar y convertir datos GIS (Geographic Information System) de hasta 5 mb de forma gratuita. Los datos GIS integran muchos tipos diferentes de capas de datos utilizando una ubicación espacial determinada, estos datos incluyen imágenes, características y mapas vinculados a hojas de cálculo y tablas. Mygeodata.cloud permite extraer y convertir datos desde openstreetmap.org seleccionando la región del mapa de donde se desea extraer información como se muestra en la figura 2.9.

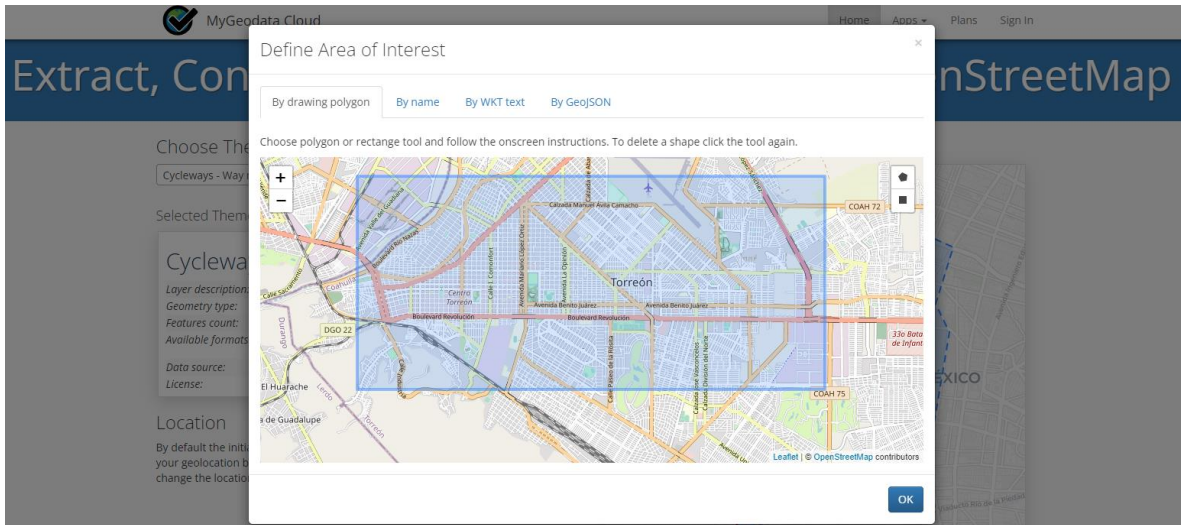


Figura 2.9. Región seleccionada para extraer y convertir datos .osm en MyGeodata.cloud.

El formato deseado es el archivo ESRI Shapefile (.shp), que corresponda al grupo de las edificaciones (*Building – Individual buildings or groups of connected buildings*). El formato se muestra en la figura 2.10.

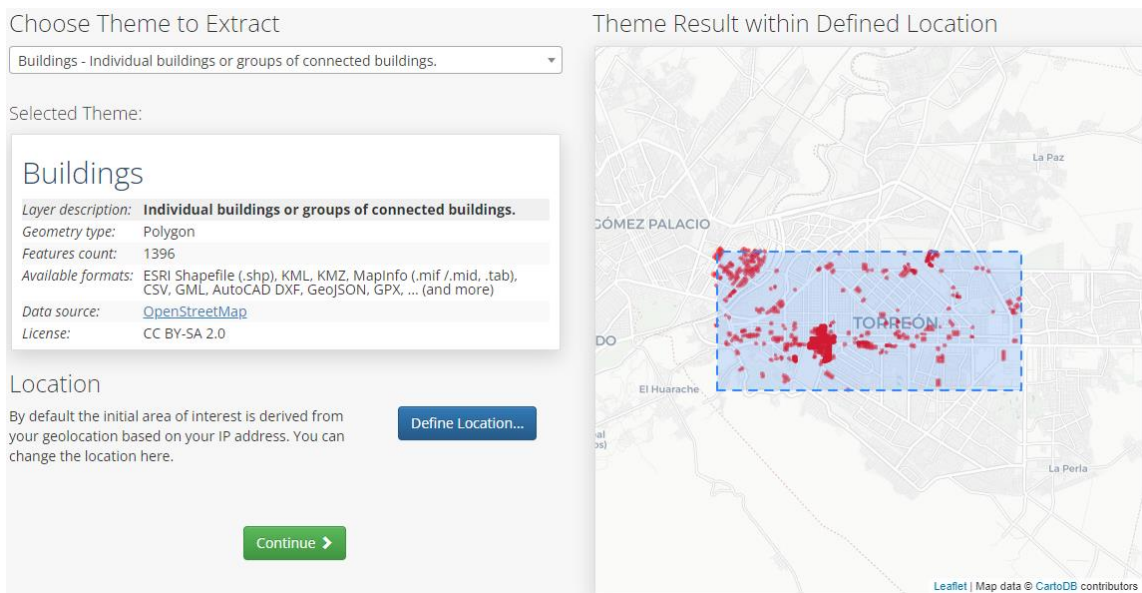
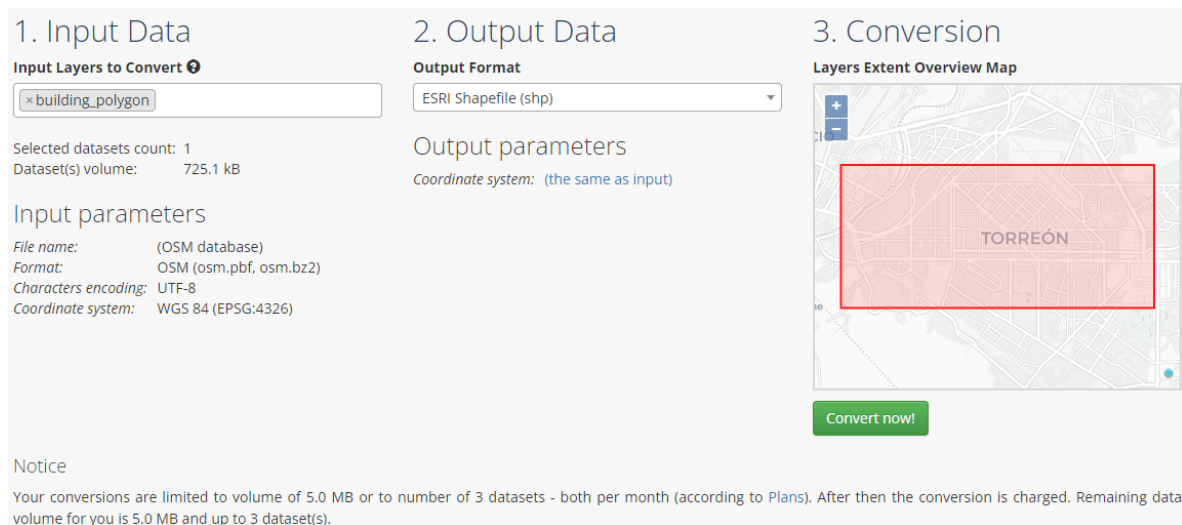



Figura 2.10. Tipo de datos a extraer en formato .shp.

Una vez establecidas las características que deseamos obtener de nuestros datos GIS, es posible convertir los datos para obtener el archivo .shp a partir de los datos de OpenStreetMap (.osm) como se muestra en la figura 2.11.



1. Input Data
Input Layers to Convert 
x building_polygon
Selected datasets count: 1
Dataset(s) volume: 725.1 KB
Input parameters
File name: (OSM database)
Format: OSM (osm.pbf, osm.bz2)
Characters encoding: UTF-8
Coordinate system: WGS 84 (EPSG:4326)

2. Output Data
Output Format
ESRI Shapefile (.shp)
Output parameters
Coordinate system: (the same as input)

3. Conversion
Layers Extent Overview Map
TORREÓN
Convert now!

Notice
Your conversions are limited to volume of 5.0 MB or to number of 3 datasets - both per month (according to Plans). After then the conversion is charged. Remaining data volume for you is 5.0 MB and up to 3 dataset(s).

Figura 2.11. Obtención de archivo de salida .shp.

El archivo .shp puede ser editable haciendo uso de programas como ARCGIS o SPM por mencionar algunos. Otra alternativa para realizar ediciones es mediante herramientas online, como mapshaper.org que permite leer y editar formatos shapefile, GeoJSON y TopoJSON.

En Mapshaper.org se pueden modificar parámetros de cada forma poligonal si es que se desea, como lo es el nombre, tipo de edificación, altura, número de pisos, como se muestra en la figura 2.12.

Cama de simulación 3D

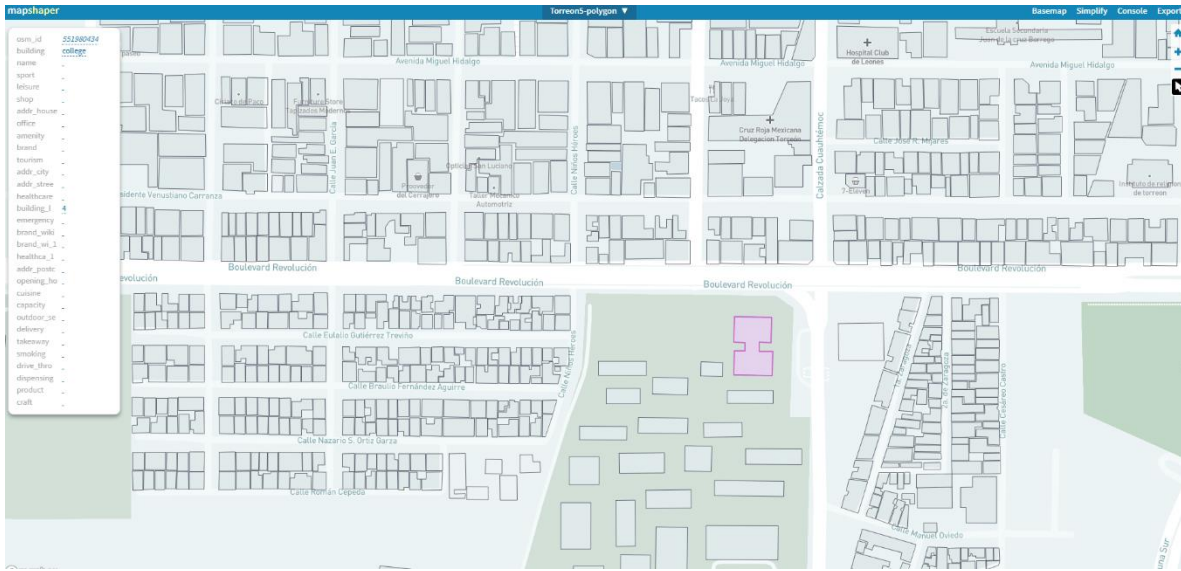


Figura 2.12. Parámetros de formas poligonales para el archivo de salida .shp.

Con esta herramienta se limitó el área que se desea para la cama de simulación, eliminando del archivo original las formas de las edificaciones restantes. El archivo .shp utilizado para la cama de simulación comprende un área de 1 km² que representa el área urbana dentro de los puntos geográficos que se especifican en la figura 2.13(a), mientras que los contornos de las edificaciones que se usaron para generar los modelos 3D se muestran en la figura 2.13(b).

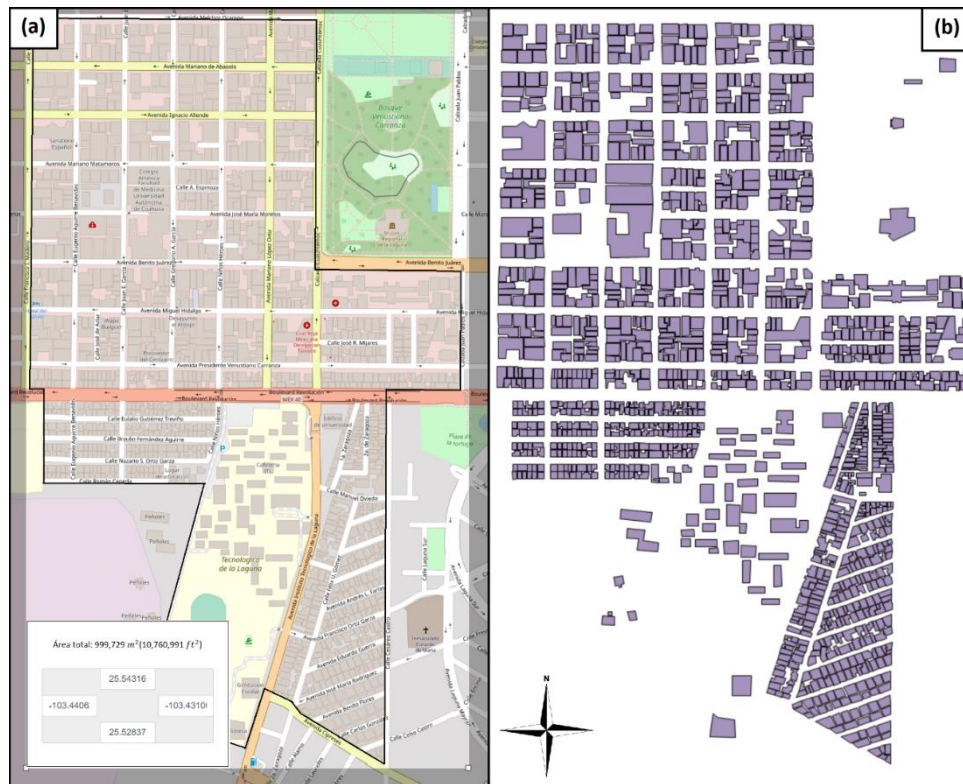


Figura 2.13. Sección de datos extraídos de osm para la generación de modelos 3D de las edificaciones. (a) Área total. (b) archivo .shp.

2.4 Datos de elevación SRTM

El representar de forma realista un entorno virtual urbano con el objetivo de desplegar y simular RIS conlleva a tomar en cuenta el mapeado de la superficie de la tierra. La diferencia de alturas de elevación de un punto a otro puede suscitar errores en el diseño de redes y en la colocación de los nodos, sobre todo si se busca implementar redes a gran escala. Contemplar este tipo de factores permite tener un panorama más amplio y más apegado a la realidad al momento de simular; y en la toma de decisiones de diseño.

Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) fue un esfuerzo internacional liderado por la NASA y la agencia nacional geoespacial de EUA (NGA), con participación de las agencias espaciales de Alemania e Italia. El propósito de SRTM era generar un modelo digital de

elevación (MDE) de la Tierra a nivel casi global utilizando interferometría [24]. El SRTM voló a bordo del transbordador espacial Endeavor durante los 11 días que duro de la misión STS-99, en febrero del 2000. Los modelos de elevación están en arreglos rectangulares, cada sección cubre 1 grado en latitud y 1 grado en longitud, nombrados de acuerdo a sus esquinas sudoestes, en total cerca del 80% de la superficie terrestre fue cubierta. Hasta antes del 2014, la resolución de los datos sin procesar disponible fuera de USA era de 3 segundos de arco. En 2015, la NASA liberó SRTM Version 3.0 Global 1-arcsecond dataset (SRTMGL1), haciendo disponible la versión de 1 segundo de arco a escala global [25]. Su raíz de error cuadrático medio (RECM) varía en rangos desde 5.9 m en áreas urbanas hasta 10.4 m en áreas boscosas [26]. En la figura 2.14, se muestra el dataset SRMT1N25W104V3 y sus atributos, sección que cubre la ciudad de Torreón y parte de la región lagunera, y que se usa en la cama de simulación 3D.

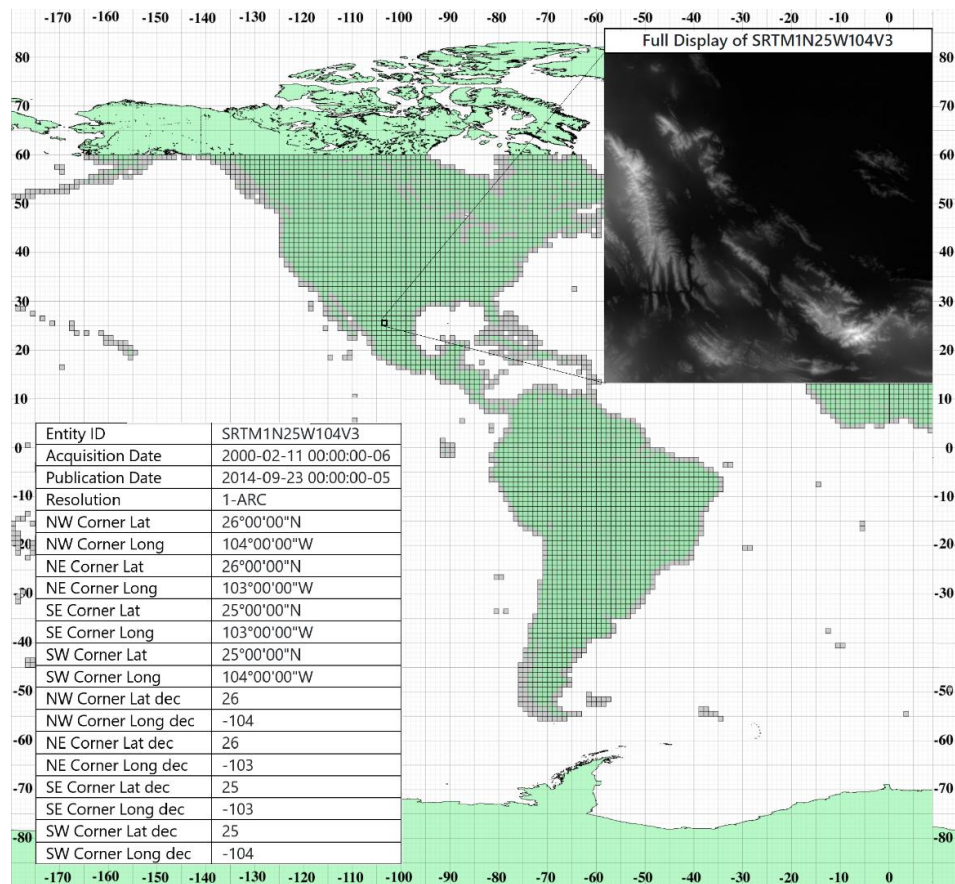


Figura 2.14. Atributos de datos de elevación SRMT1N25W104V3.

2.4.1 Obtención de datos de elevación para cama de simulación 3D

Los datos se extraen desde earthexplorer.usgs.gov en formato .tif, el procedimiento se muestra a continuación:

1. Registrarse en la página earthexplorer.usgs.gov.
2. Seleccionar los puntos (polygon) aproximados del área deseada para descargar como se muestra en la figura 2.15.

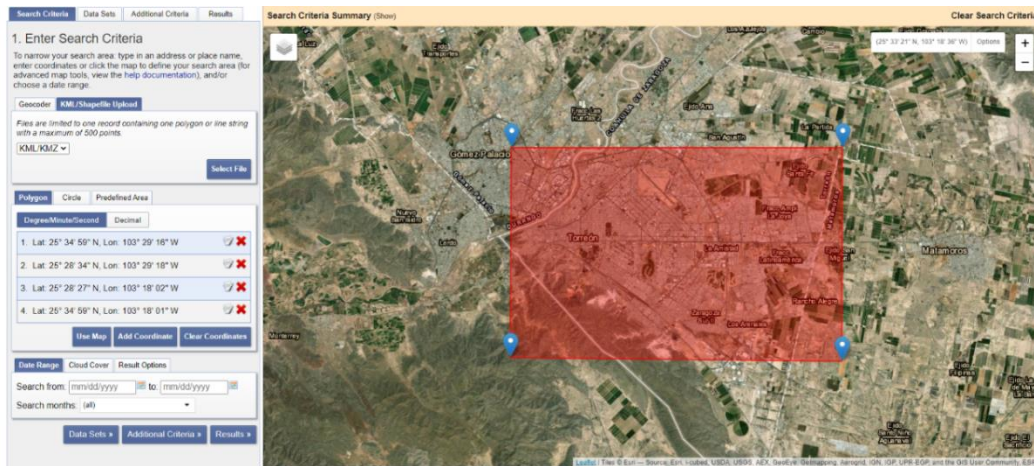


Figura 2.15. Criterio de selección de puntos del área deseada.

3. Seleccionar el origen de datos SRTM 1 Arc-Second Global (figura 2.16).

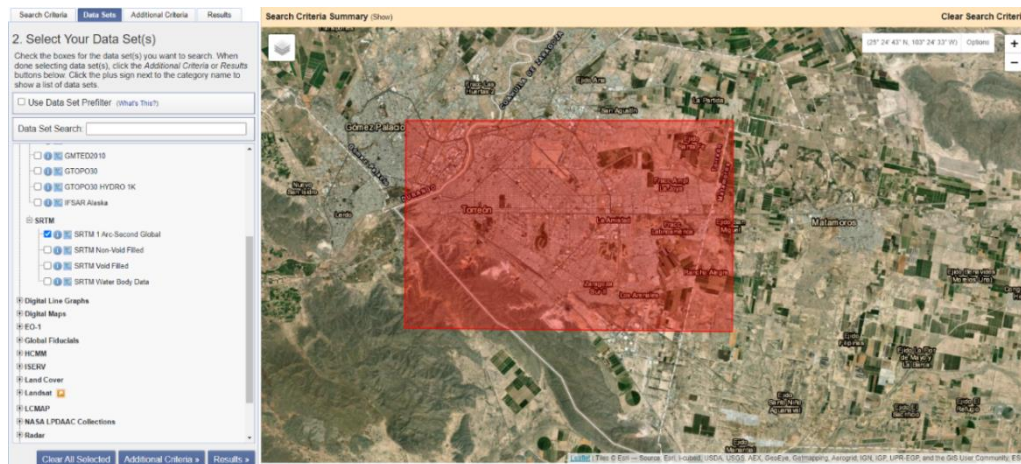


Figura 2.16. SRTM 1 Arc-Second Global Data set.

4. En “resultados” se muestra el área que cubre la sección deseada con ID SRMT1N25W104V3, (figura 2.17).

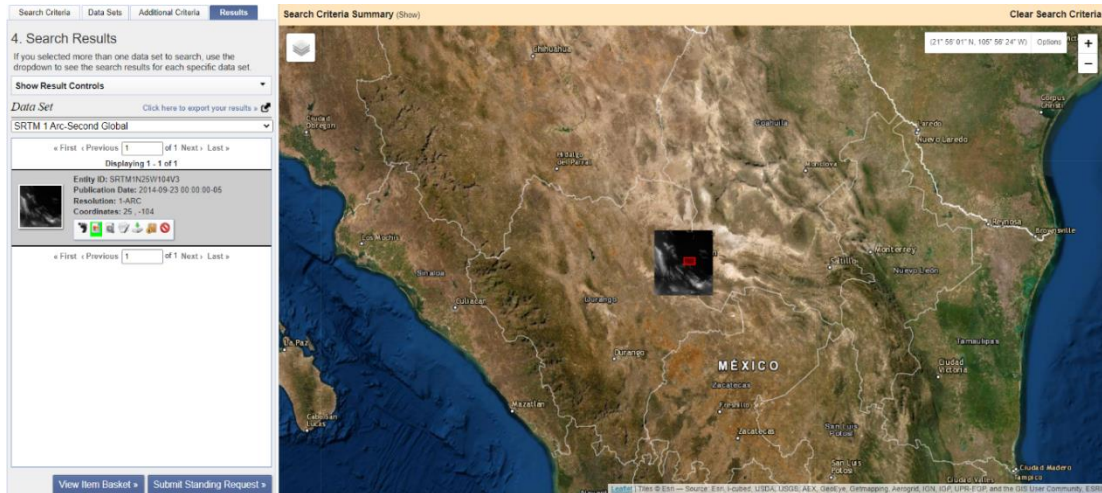


Figura 2.17. Entidad con ID SRMT1N25W104V3.

5. Seleccionar la opción descargar en el recuadro de la entidad y seleccionar la 3ra opción GeoTIFF 1 Arc-second, como se muestra en la figura 2.18.

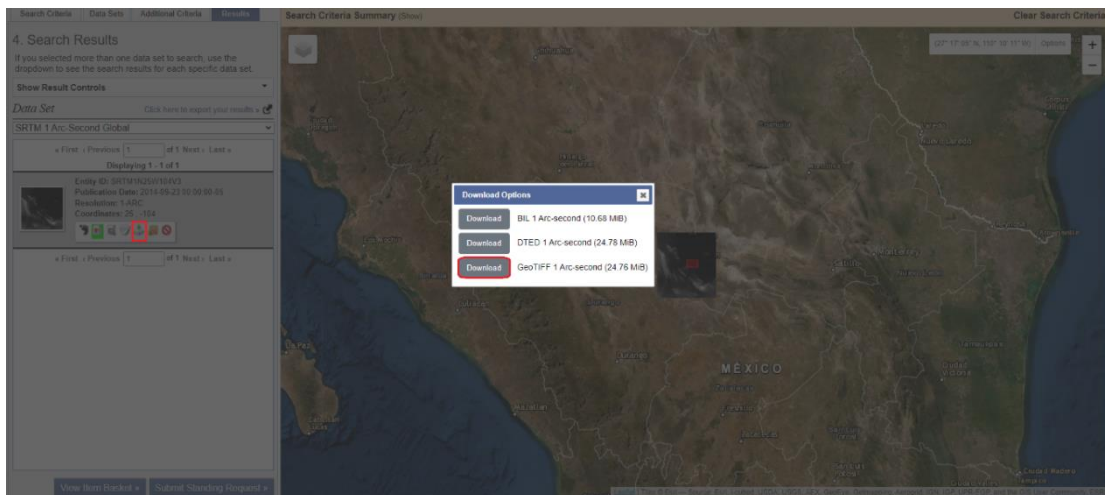


Figura 2.18. Descargar archivo .tif.

TIF (Tagged Image File Format) es un formato de archivo, el cual almacena imágenes de mapa de bits y se cargan en el archivo .earth como una capa más.

2.5 Objetos físicos en simulación

El mapa generado por osgEarth no afecta las simulaciones, solo da el contexto de un mundo real. Para que los nodos de una red interactúen con su ambiente, se deben agregar objetos físicos, INET framework se encarga de esta tarea. Con el módulo PhysicalEnvironment configurado, se representan bloques en forma de edificios u otra forma geométrica, las cuales pueden influir en las transmisiones de radio y provocar pérdida de paquetes en las comunicaciones.

El módulo PhysicalEnvironment es responsable de colocar los objetos físicos en la escena del mapa, con la ayuda de coordenadas geográficas predefinidas en un archivo XML [27]. Mientras que el modelo DielectricObstacleLoss determina la pérdida de potencia de transmisión tomando en cuenta las propiedades dieléctricas y reflexión del material especificado, además de considerar la forma, la posición y la orientación del objeto físico [28].

Una vez agregadas las formas y posiciones en el archivo .xml, durante la ejecución de simulaciones, la escena es similar a lo que se muestra en la figura 2.19.



Figura 2.19. Objetos físicos durante simulación.

Los objetos que representan los bloques de edificios de concreto se muestran en bloques rojos semitransparentes, mientras que los grupos de árboles se representan por esferas

semitransparentes. La opacidad de estas formas se puede variar y se colocan totalmente transparentes cuando los modelados 3D generados por osgEarth se encuentra activados.

2.6 Características de la plataforma de simulación y comparativa con otros simuladores

En la figura 2.20 se muestran las principales características del área de simulación disponible. Los objetos físicos agregados para la simulación se muestran en la figura 2.19(a), los cuales cubren la misma área que los modelos 3D de las edificaciones generados por OsgEarth observadas en la figura 2.19. En la figura 2.20(b), se muestran los datos de elevación de SRMT que cubren un área de 111.12 km x 111.32 km. El despliegue de nodos de las redes inalámbricas, así como las transmisiones de paquetes en el medio físico y animaciones generadas por INET framework se observan en la figura 2.20(c).

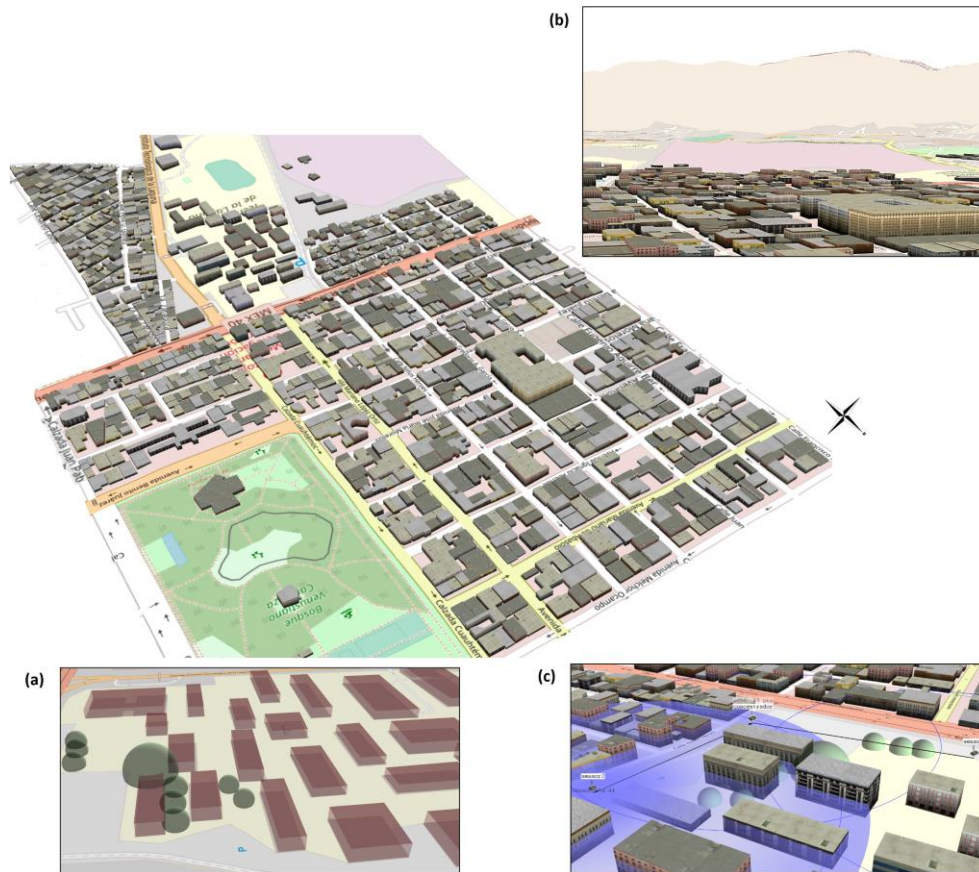


Figura 2.20. Características de la cama de simulación 3D: (a) Objetos físicos, (b) Datos de elevación SRTM, (c) Despliegue de nodos.

2.6.1 Redes 5G

Otra característica principal de la plataforma es la capacidad de simular redes 5G, gracias a Simu5G, basado en el framework de OMNeT++ y siendo la evolución del popular simulador de redes SimuLTE. La idea detrás del desarrollo de Simu5G es permitir que los investigadores simulen y comparen sus soluciones y servicios con tecnologías 5G en un framework fácil de usar y beneficiándose del concepto de modularidad de OMNeT++, además de la posibilidad de integrarse con otros módulos de INET framework [29]. Simu5G requiere OMNeT++ 5.6.2 e INET framework 4.4.4, anunciando su lanzamiento en Abril del 2021[30]. La librería y módulos de Simu5G, la arquitectura de redes 5G y como Simu5G los modela, además de su integración con OMNeT++ lo presentan en [31]. Los mismos autores concluyen que Simu5G es una de las dos únicas librerías existentes que permiten comunicaciones complejas end-to-end a nivel de aplicación, bajo escenarios heterogéneos (junto 5G-LENA), pero es el único que permite implementaciones ENDC, FDD y comunicaciones D2D, MEC y CV2X.

2.6.2 Accesibilidad

Un aspecto importante a tomar en cuenta es que tan accesible es un simulador, OMNeT++ es de los más completos al ser de código abierto, trabaja en Windows y Linux, cuenta con soporte continuo, está bien documentado, excelente facilidad de depuración (Debugeo) y tiene interfaz de usuario grafica a diferencia en este último aspecto en simuladores como NS-2, NS-3, ATEMU, Avrora, Castalia, SES, SENSE y TOSSIM [32].

2.6.3 Escalabilidad

Debido a las áreas extensas que se deben cubrir en un ambiente urbano es importante la cantidad de nodos que se pueden simular, OMNeT++ es capaz de soportar simulaciones de redes inalámbricas de gran escala, de entre 400 hasta 2000 nodos [33], cantidad similar a simuladores como Castalia, GloMoSim, TOSSIM, SENSE y mayor que ATEMU, Emstar, J-Sim y NS-2.

2.6.4 Desempeño

En términos de desempeño, OMNeT++ cuenta con un aceptable tiempo de proceso computacional, realizando procesos más rápido que simuladores como NS-2, TOSSIM y J-Sim pero con peor desempeño que NS-3 [34]. En lo relacionado con el uso de CPU, OMNeT++ es

el que mejor se comporta junto con J-Sim y en cuanto a memoria utilizada es de los que peor se comporta, solo superando a NS-2.

2.6.5 Ciudades 2D/3D

En la literatura disponible se pueden encontrar simuladores con representaciones de ciudades con enfoques muy específicos como simulación de tráfico y redes vehiculares Ad-Hoc (VANET) como Veins y Siafu. CupCarbon [35], la plataforma se enfoca en simulaciones de RIS dedicada a ciudades inteligentes y el IoT que toma en cuenta propagaciones de radio e interferencias generadas por nodos desplegados en una ciudad digital 3D. IU-SCS [36], es un simulador de ciudades inteligentes 3D, que permite evaluar costos, tiempos, recursos y cobertura de sensores en una ciudad digital 3D. La principal ventaja de la cama de simulación 3D que presentamos es que OMNeT++ es un simulador muy utilizado, documentado y que permite la integración con otros simuladores con enfoques muy diversos.

CAPÍTULO 3

REDES INALAMBRICAS DE SENSORES: PROTOTIPOS, DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO

Debido al creciente desarrollo de tecnologías inalámbricas, el uso de comunicaciones con infraestructuras alámbricas complejas se han visto reducido, facilitando el manejo y consumo de información de cualquier tipo en lugares con topografías cambiantes y de difícil acceso. Las redes inalámbricas de sensores (RIS) han surgido como consecuencia principalmente a necesidades de detección, caracterizados por una fabricación de bajo costo e ingeniería en la reducción de tamaño y teniendo en cuenta su operación en baja potencia con ahorro energético. Una RIS está compuesta por una cierta cantidad de dispositivos distribuidos espacialmente sobre un área determinada, los cuales se comunican entre sí usando radiofrecuencias preestablecidas y equipados con sensores para monitorear y medir condiciones físicas y contaminantes en el ambiente. El flujo de información varía dependiendo de la función de cada nodo dentro de la red, dotando a las RIS de una amplia flexibilidad y capacidad de distribución inteligente en entornos complicados.

En este capítulo se muestran las diversas etapas en el desarrollo de un prototipo de nodo sensor para el despliegue de RIS en Torreón, se describen brevemente sus principales componentes elegidos y pruebas realizadas para conocer el rango de comunicación de los nodos así como su eficiencia a diferentes distancias.

3.1 Nodo Sensor

Un nodo sensor es la unidad básica que conforma a las RIS y es el encargado de realizar algún procesamiento y comunicar a otros nodos de la red la información reunida a lo largo del tiempo. Un nodo sensor también es conocido como mote y su arquitectura cuenta con cuatro

elementos básicos [37]: la unidad sensora, unidad de procesamiento, la comunicación y la fuente de poder como se representa en el diagrama de la figura 3.1.

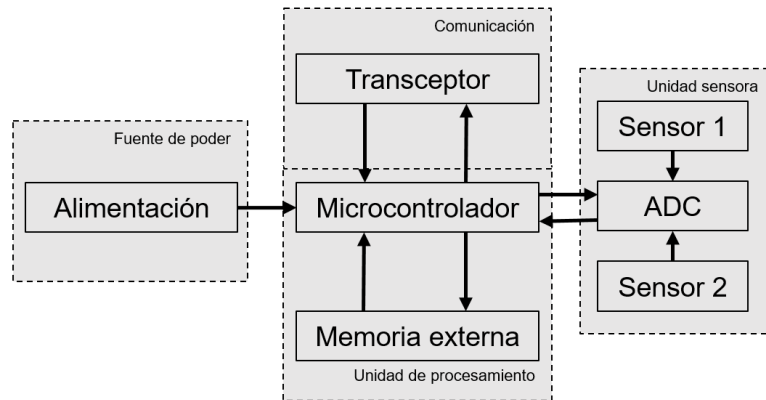


Figura 3.1. Arquitectura del nodo sensor.

3.1.1 Tarjeta CC1350 LaunchPad

Para los prototipos de nodos sensores se empleó un microcontrolador CC1350 de Texas Instruments, bajo su ecosistema LaunchPad que soporta comunicaciones Sub-1GHz + BLE. Esta tarjeta de adquisición de datos de Texas Instruments integra en un solo chip el sistema de RF y el convertidor DC/DC. Además de un chip dedicado de consumo ultra bajo encargado para el manejo en particular de los sensores, configurable para sensores analógicos y digitales [38]. La tarjeta forma parte de la plataforma SimpleLink de Texas Instruments, ofreciendo una gran cantidad de herramientas con un SDK compartido para la integración y uso con otras plataformas como Wi-Fi, Bluetooth de bajo consumo, Sub-1 GHz, Ethernet, Zigbee. En la Figura 3.2 se muestra la Tarjeta TI Launchpad CC1350.

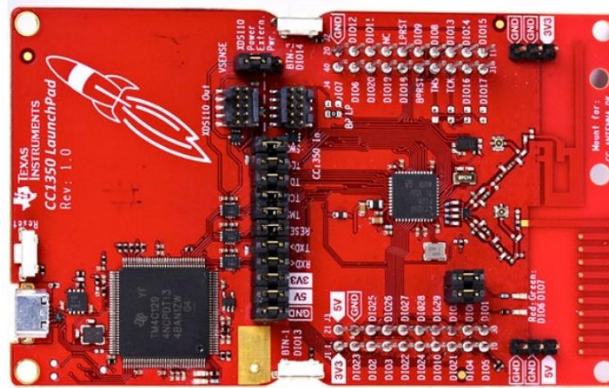


Figura 3.2. Tarjeta TI Launchpad CC1350

Considerando las características antes mencionadas y su precio accesible, se optó por esta tarjeta para el desarrollo del prototipo de nodos sensores, superando en prestaciones a tarjetas como la Frackduino y Arduino MEGA con su módulo RF como se muestra en la comparativa en [39].

3.1.2 Antena Pulse Electronics W5017

Existe una gran diversidad en tipos de antenas, dependiendo de la aplicación y necesidades de diseño de una red, siendo este dispositivo una parte muy importante en cualquier comunicación de radio. Todas las antenas cumplen el mismo objetivo, el cual es difundir o captar ondas radioeléctricas, convirtiendo las señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa.

Las antenas omnidireccionales generan una radiación uniforme y en todas direcciones. De ahí que sean de las más utilizadas, e ideales para aplicaciones con redes inalámbricas de sensores, donde la densidad de nodos desplegados en una zona y topología de la red son aspectos importantes a considerar. Una antena direccional limita la cobertura de las redes y obliga a que el flujo de información sea mucho más rígido (un camino limitado y preestablecido de la información por la limitante de la dirección), además conlleva a una instalación más compleja al momento del despliegue de los nodos. El uso de antenas omnidireccionales facilita que los

nodos puedan auto configurar el flujo de la información hacia determinado nodo o concentrador, dependiendo del protocolo de enrutamiento que se utilice y el consumo energético.

Debido a lo anterior se optó por incorporar una antena omnidireccional externa tipo “whipe” de la marca Pulse Electronics a los prototipos de nodos sensores la cual se muestra en la figura 3.3 y con las características que se muestran en la Tabla III.1. La tarjeta Launchpad CC1350 cuenta con antenas PCB incorporadas tanto de Sub-1 GHz como de BLE pero permite incorporar antenas externas que posean mayores ganancias y mejores coberturas.



Figura 3.3. Antena Pulse Electronics W5017 y conector Murata 81-MXFR01JA1000

Tabla III.1. Especificaciones Antena Pulse Electronics W5017 [40].

Frecuencias	868 – 928 MHz
Impedancia nominal	50 Ω
Ganancia	2 dBi
Radiación de antena	Isotrópica
Longitud	179mm

La antena PE W5017 trabaja en bandas ISM, reservadas internacionalmente para aplicaciones industriales, científicas y médicas.

Los patrones de radiación de este tipo de antenas es idealmente isotrópica, una forma utópica de representar la cobertura que radia una misma intensidad a todas las direcciones del espacio, utilizada como referencia para definir patrones de antenas reales, este tipo de radiación se puede observar en la figura 3.4(b). Una manera más realista de representar la radiación de este tipo de antenas es la radiación omnidireccional que se muestra en la figura 3.4(a), con su forma de dona característica.

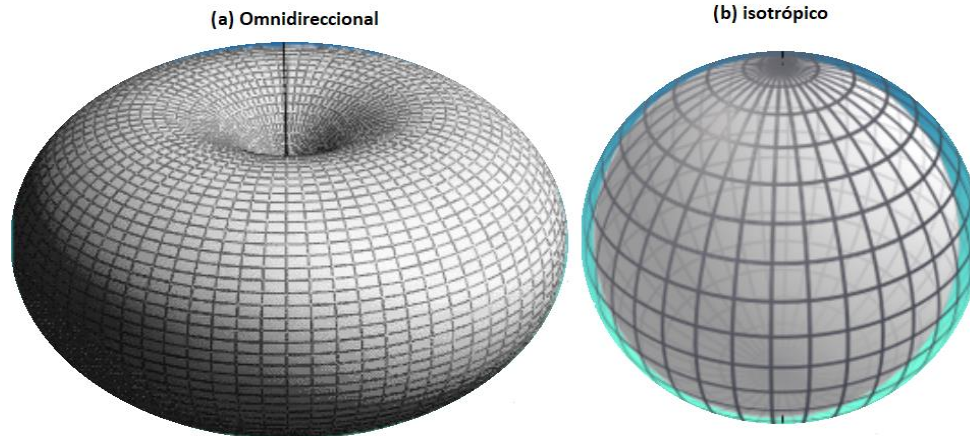


Figura 3.4. Patrón de radiación, (a) Omnidireccional, (b) Isotrópico [41]

Las bandas IMS trabajan en frecuencias sub-1GHz, la antena PE W5017 trabaja en un espectro de frecuencias entre 868 MHz y 928 MHz, y sus patrones de radiación reales se muestran en la figura 3.5(a), para el plano horizontal y la figura 3.5(b), para el plano vertical.

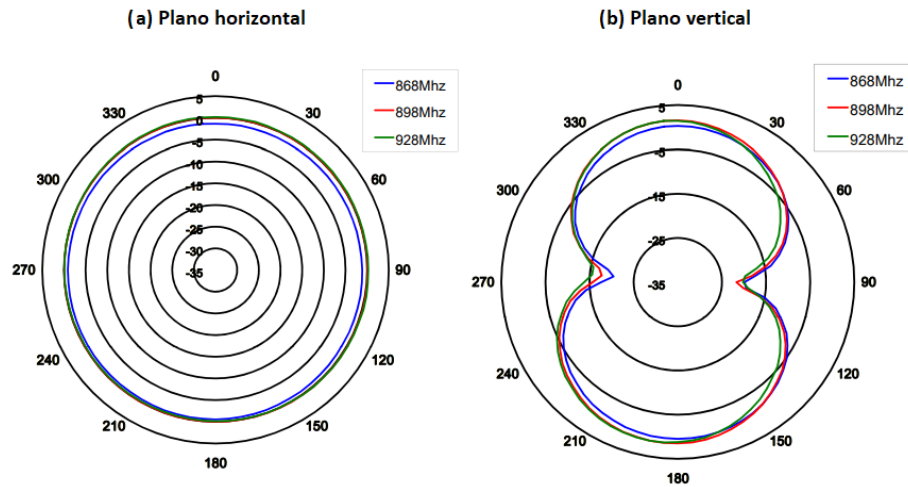


Figura 3.5. Patrón de radiación real antena Pulse Electronics W5017, (a) Plano horizontal, (b) Plano vertical [41]

3.1.3. Sensor de CO₂ MG811

Los prototipos de nodos sensores cuentan con un sensor de CO₂ electroquímico MG811. Este tipo de sensores resistivos, cambian el valor de su resistencia dependiendo de la concentración de gas en el aire con el que tiene contacto, haciendo uso de una membrana permeable, se genera una reacción química que provoca una variación en la resistencia eléctrica del sensor. La caracterización del sensor MG811 se pueden encontrar en [39]. En la figura 3.6, se muestra el sensor MG811.



Figura 3.6. Sensor de CO₂ MG811.

3.1.4 Prototipo de nodo sensor versión 1: Diseño y construcción

Existen diversos factores que se debe tomar en cuenta para proteger la electrónica del nodo sensor, garantizando su correcto funcionamiento y alargar su vida útil. Una estructura fiable en un ambiente urbano es muy relevante, donde se debe garantizar una resistencia aceptable a cualquier tipo de impacto, tener una capacidad permeable para diversos tipos de fluidos y reducir la acumulación de polvo. Además debe contar con un flujo de aire adecuado en su interior para reducir la temperatura de los dispositivos.

La estructura protectora del primer prototipo de los nodos sensores consiste en una caja eléctrica de plástico ABS bajo la norma internacional IP65, que protege contra el agua, polvo, rayos UV, estática y corrosión. En la figura 3.7(a), se muestra las dimensiones de la caja y en la figura 3.7(b), las partes principales.

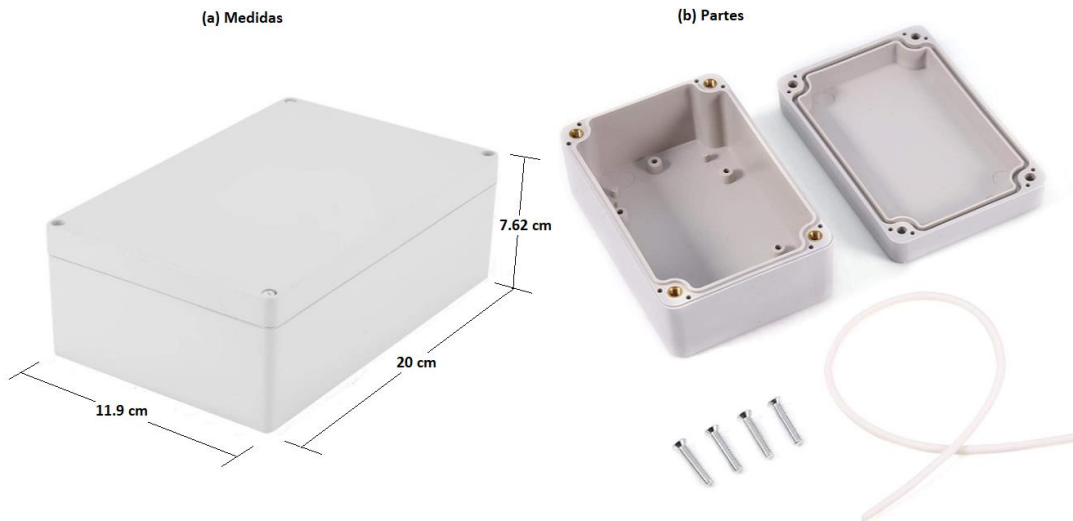


Figura 3.7. Caja para prototipo de nodo sensor versión 1, (a) Dimensiones, (b) Partes.

El prototipo cuenta con un diseño específico de la carcasa para el sensor MG811 [39], en forma de campanas superpuestas que permiten el flujo de aire y caída de agua, además de un compartimento para el sensor y un ducto para el manejo de cables y anclaje con la caja

estructural del nodo. En la figura 3.8(a), se muestra la impresión 3D de carcasa protectora del sensor MG811 en material PLA, en la figura 3.8(b), se muestra una vista de sección de la carcasa.

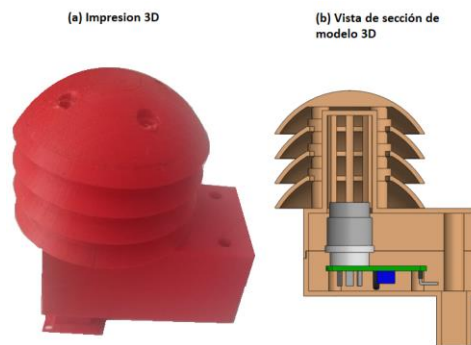


Figura 3.8. Carcasa para sensor MG811, (a) Impresión 3D, (b) Vista de sección [39].

El ensamble del prototipo del nodo sensor versión 1 se muestra en la figura 3.9. Donde se realizaron barrenos para el orificio de la antena externa y el espacio para el ducto de la carcasa del sensor MG811.



Figura 3.9. Prototipo de nodo sensor versión 1.

3.1.5 Prototipo de nodo sensor versión 2: Diseño y construcción

Debido al alcance del proyecto para el despliegue de redes inalámbricas de sensores en la región, se deben considerar diversas alternativas de diseño para la estructura de los nodos sensores, tales que permitan en un futuro incorporar elementos que se tienen previstos para el funcionamiento autónomo de los nodos. Poder incorporar más cantidad de sensores y que se encuentren protegidos es algo necesario, y que se debe tener en cuenta en el diseño. Debido a esto, se realizó un diseño que a nivel estructural sea adecuado para desplegarse en ambientes urbanos, que sea impermeable, resistente, antiestático y con materiales anticorrosivos como la versión antes mostrada, pero con los cambios pertinentes en el diseño [42]. En la figura 3.10, se muestra el diseño del prototipo de nodo sensor versión 2, en la figura 3.10(a), se muestra las partes explosionadas y en la figura 3.10(b) la impresión 3D.

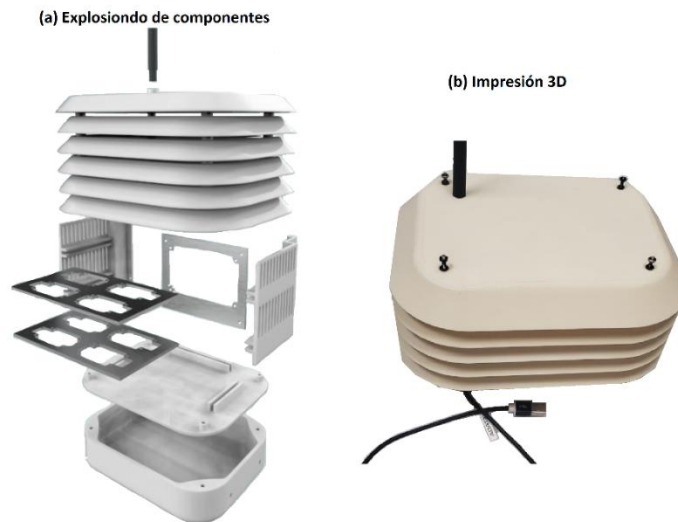


Figura 3.10. Prototipo de nodo sensor versión 2 [42], (a) Explosión de componentes, (b) Impresión 3D.

El diseño cuenta con espacio para 8 sensores, la tarjeta TI LaunchPad CC1350, la antena y espacio para una batería en la parte inferior. La estructura permite el flujo directo de aire a través de rejillas en los costados, además cuenta con divisiones en forma de pagodas que aportan

rigidez y permiten que el agua escurra hacia sus costados. En la figura 3.11(a), se muestra una vista interior del prototipo, mientras que en la figura 3.11(b), se muestra el flujo de aire y el agua a través de este diseño.

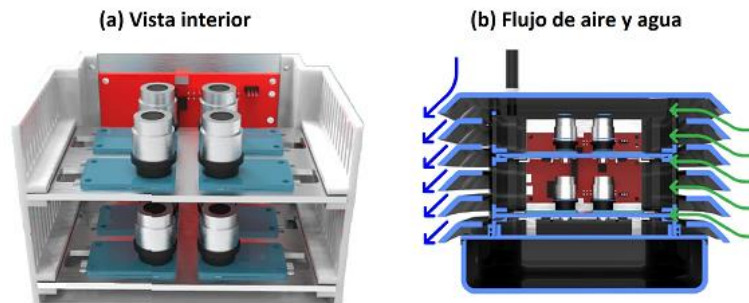


Figura 3.11. Prototipo de nodo versión 2 [42], (a) Vista interior, (b) Flujo de aire (flechas verdes) y escurrimiento de agua (flechas azules).

Los materiales principales se componen por piezas de acrilonitrilo estireno acrilato (ASA) y en el interior hay placas de aluminio anodizado que generan mayor rigidez y que soportan la electrónica.

3.2 Conectividad Inalámbrica

Elegir adecuadamente la tecnología inalámbrica a utilizar es crítico, y en especial en una red inalámbrica de sensores, donde ciertas condiciones deben cumplirse para su funcionamiento adecuado. Las tecnologías inalámbricas más comunes son WiFi y Bluetooth. Sin embargo, su uso se limita a conectividad de dispositivos con coberturas de bajo rango, altas velocidades de transmisión y sin importar especialmente el consumo energético. Existen estándares de tecnologías inalámbricas ampliamente utilizados en proyectos de redes de sensores como lo pueden ser ZigBee, Sub-1 GHz, 6LowPan, BLE y Z-Wave. En la tabla III.2, se muestra una comparación entre estas tecnologías inalámbricas.

Tabla III.2. Comparación entre estándares de comunicación inalámbrica [39], [43], [44].

Protocolo	Zigbee	Bluetooth	Wifi	Sub-1 GHz	6LowPan	BLE	Z-Wave
Frecuencia	2.4 GHz, <1 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	< 1 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	< 1 GHz
Velocidad	20 Kbps, 40 Kbps, 250 Kbps	1 Mbps	50 Mbps	100 Kbps	1 Mbps	1 Mbps	100Kbps
Rango	100 m	10 m	100 m	1 Km	200 m	100 m	800m
Nodos	65000	8	2007	Variable	100	8	232
Consumo aproximado	1-10 mW	40-100 mW	>160mW	12.5 mW	1mW	0.01-0.5 mW	1-10mW

Teniendo en cuenta la tabla anterior, hay estándares inalámbricos que resultarían poco eficientes para ser aplicados a proyectos de redes inalámbricas de sensores. El principal inconveniente es el rango de frecuencias en que trabajan, siendo 2.4 GHz la más utilizada y donde hay una gran posibilidad de interferencias. Por lo tanto, estándares como WiFi, Bluetooth, BLE y 6LowPan se descartaron para este proyecto. Por otra parte, Zigbee, Sub-1 GHz y Z-Wave trabajan a frecuencia en bandas ISM menores a 1 GHz y tienen un consumo similar ideal para una autonomía sostenida de los nodos. Si bien estas tres tecnologías se adecuan a las necesidades del proyecto, se optó por Sub-1 GHz debido a que la tarjeta CC1350 de Texas Instruments la incorpora, obteniendo rangos de cobertura altos y consumos energéticos bajos. Además, la tarjeta es dual band con WiFi integrado, teniendo alternativas de conectividad con dispositivos convencionales si la red inalámbrica de sensores lo necesita.

3.3 Bandas de uso libre y en desuso en México.

Conocer la clasificación del espectro radioeléctrico dentro de un territorio es necesario cuando se trabaja con tecnologías inalámbricas. El espectro radioeléctrico es un bien de dominio público en México, el cual es limitado y por lo tanto debe ser regulado eficientemente. En este sentido, se han determinado mecanismos que habilitan ciertas porciones del espectro de acceso libre sin que sea necesario contar con una concesión o autorización para su uso, esto con el

objetivo de atender necesidades de comunicación inalámbrica para el público en general. Existen diversos acuerdos emitidos por el Instituto Federal de Telecomunicaciones, los cuales indican las bandas de frecuencias que pueden ser utilizadas y las características técnicas de operación.

Las frecuencias que nos competen son las denominadas Sub-1GHz, en este caso las frecuencias que se usaron en las comunicaciones inalámbricas con los prototipos de nodos sensores fueron dentro del segmento de uso libre y frecuencias en desuso.

3.3.1 Segmento de frecuencias 902 MHz – 923 MHz

El acuerdo SCT 130306, DOI 13/03/2006 es la referencia normativa entre los segmentos de 902 MHz – 923 MHz, que identifica las frecuencias que corresponden a las bandas de uso libre para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ICM) para transmisión de baja velocidad [45].

Las características técnicas que deben considerarse son las siguientes [46]:

- Potencia máxima de transmisión entregada a las antenas: no mayor a 1 W
- Máxima ganancia direccional de antenas de transmisión: 6 dBi de manera que se obtenga una Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima de 4 W.
- Si la ganancia direccional de la antena es mayor a 6 dBi, la potencia total de entrada a las mismas deberá ser reducida en la misma cantidad que la ganancia direccional exceda de 6 dBi.
- En caso de ser un dispositivo de radiocomunicación de corto alcance, la intensidad de campo eléctrico no deberá exceder de 200 μ V/m, medida a una distancia de 3 m.

3.3.2 Segmento de frecuencias 900 MHz – 902 MHz

Estos segmentos fueron concesionados para la prestación del servicio de comunicación personal de banda angosta (paging). Este servicio se encuentra prácticamente en desuso [45].

3.4 Firmware RF de los nodos sensores

Un firmware es un conjunto de instrucciones de un programa informático que sirven para comunicarse con los dispositivos de hardware de un sistema, lo cual es necesario para el correcto

funcionamiento de los niveles superiores de software. Las tarjetas Texas Instruments cuentan con una capa de abstracción que trabaja sobre el controlador de radiofrecuencia llamada EasyLink, el cual tiene la función de simplificar la creación de aplicaciones sobre los protocolos de comunicación propietarios de TI y en específico para las tarjetas CC13XX/CC26XX [47]. Texas Instruments con el uso de la herramienta SmartRF studio permite modificar parámetros de comunicación importantes que utiliza el API EasyLink, exportando valores que especifican el protocolo utilizado, tipo de paquete y los parámetros de radiofrecuencia. Con el uso de EasyLink como base, es posible usar Energía IDE para la programación de las tarjetas de los nodos.

3.5 Energía IDE

El entorno de desarrollo integrado (IDE), denominado Energía es una plataforma de código abierto para el desarrollo y programación de prototipos electrónicos fundada por Robert Wessels en 2012, con el objetivo de llevar la programación Wiring y entorno Arduino al ecosistema LaunchPad de Texas Instruments [48]. La programación de la tarjeta LaunchPad CC1350 se realizó en Energía IDE, bajo este entorno se usó la librería de EasyLink Sub-1GHz para establecer las instrucciones de comunicación RF [49]. En la figura 3.12, se muestra el entorno de desarrollo de Energía IDE.



```
Energia_Rocks.ino | Energia 1.6.10E18
Energia_Rocks.ino
1 #define LED_RED_LED
2
3 // the setup routine runs once when you press reset:
4 void setup() {
5   // initialize the digital pin as an output.
6   pinMode(LED, OUTPUT);
7 }
8
9 // the loop routine runs over and over again forever:
10 void loop() {
11   digitalWrite(LED, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
12   delay(1000); // wait for a second
13   digitalWrite(LED, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
14   delay(1000); // wait for a second
15 }
```

Done Saving.

15 RED LaunchPad w/ msp432 EMT (48MHz) on /dev/cu.usbmodemM4321001

Figura 3.12. Entorno de desarrollo integrado Energía IDE.

3.6 Aplicación LabVIEW y Generación de reportes

Parte fundamental en la toma de lecturas provenientes de diferentes fuentes es el como se recopila, ordena, almacena y muestra la información para su posterior análisis. El manejo de datos en las redes inalámbricas desplegadas y pruebas realizadas con los prototipos de nodos, se realizó con la ayuda de una aplicación desarrollada con la plataforma LabVIEW, la cual se conecta al nodo Concentrador (también conocido como Sink), que a su vez recolecta la información proveniente de los nodos sensores de la red. En la figura 3.13, se muestra una representación del proceso de comunicación hasta la generación de reportes.

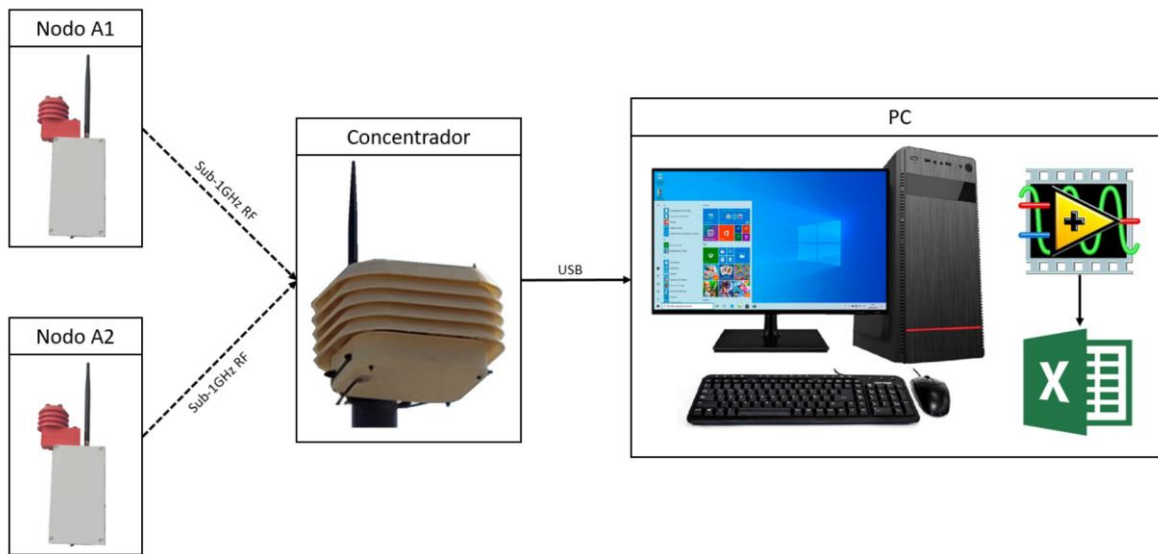


Figura 3.13. Proceso de comunicación y generación de reportes.

3.6.1 Plataforma LabVIEW

LabVIEW es una plataforma que integra herramientas para el desarrollo de sistemas de medición y control, haciendo uso de un lenguaje de programación gráfico conocido como lenguaje G. LabVIEW está orientado a desarrollar aplicaciones para instrumentación que integra una serie de librerías para comunicación con instrumentos electrónicos como GPIB, RS232 o RS485 con tarjetas de adquisición de datos, sistemas de adquisición y acondicionamiento como

VXI o SCXI, comunicación en redes TCP/IP, UDP o en estándares de software COM, OLE, DDE, DLL o ActiveX para Windows, así como AppleEvents para MacOS o PIPE para UNIX [50]. LabVIEW fue creado por National Instruments en el año de 1976 para funcionar sobre maquinas con MacOS, saliendo al mercado hasta el año 1986. Actualmente se encuentra disponible en Windows, MAC, UNIX y GNU/Linux.

3.6.2 Aplicación LabVIEW

La aplicación LabVIEW cuenta con una interfaz gráfica simple, centrando su diseño en mostrar la última recepción realizada por el nodo concentrador proveniente de los nodos de la red. La aplicación cuenta con pestañas que facilitan la navegación dependiendo de la información que se quiere consultar. En la figura 3.14, se muestra la pestaña principal que corresponde a toda la información que recibe el concentrador.

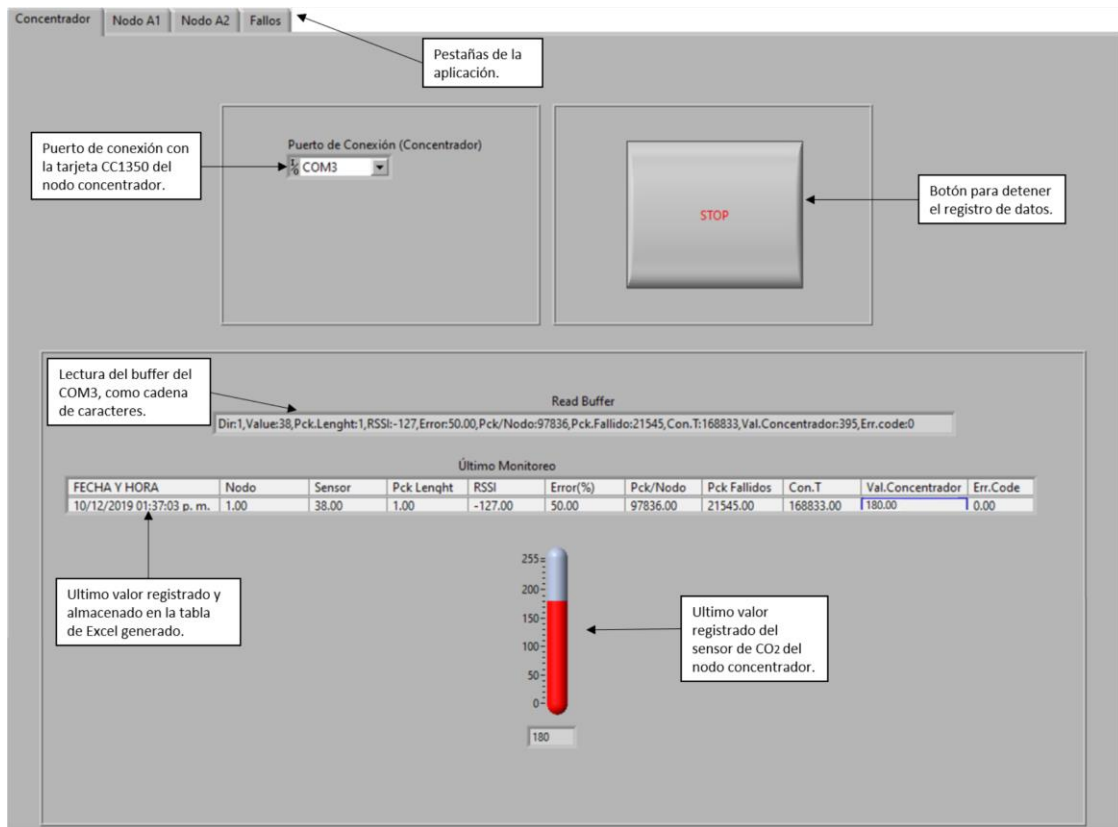


Figura 3.14. Pestaña principal de la interfaz gráfica LabVIEW.

Las once columnas de la tabla son las siguientes:

- **Fecha y Hora:** Almacena la fecha y hora de la última recepción del concentrador en formato fecha y hora larga.
- **Nodo:** Almacena el Id, en este caso el número asignado del nodo sensor que le corresponde dentro de la red.
- **Sensor:** Almacena el valor del sensor de CO₂ correspondiente al nodo transmisor con numero o Id del campo anterior llamado Nodo.
- **Pck Lenght:** Almacena la longitud del paquete recibido.
- **RSSI:** Almacena el valor de RSSI detectado de la señal recibida.
- **Error%:** Almacena el porcentaje de error en la recepción
- **Pck/Nodo:** Almacena la cantidad de paquetes recibidos correctamente por el nodo concentrador provenientes de nodo con ID que le corresponde.
- **Pck Fallidos:** Almacena la cantidad de paquetes fallidos.
- **Con. Total:** Almacena la cantidad de paquetes totales recibidos por el concentrador provenientes de todos los nodos de la red.
- **Val. Concentrador:** Almacena el valor del sensor de CO₂ que se encuentra en el nodo concentrador.
- **Err. Code:** Almacena el código de error generado por el API EasyLink al haber paquetes fallidos.

Todos los campos de la tabla son del tipo varchar, variando en algunos solamente la longitud de datos que soportara cada campo.

En la figura 3.15, se muestra la pestaña correspondiente al nodo 2 de la red, mientras que en la figura 3.16, se muestra la pestaña de los paquetes fallidos (con código de error).

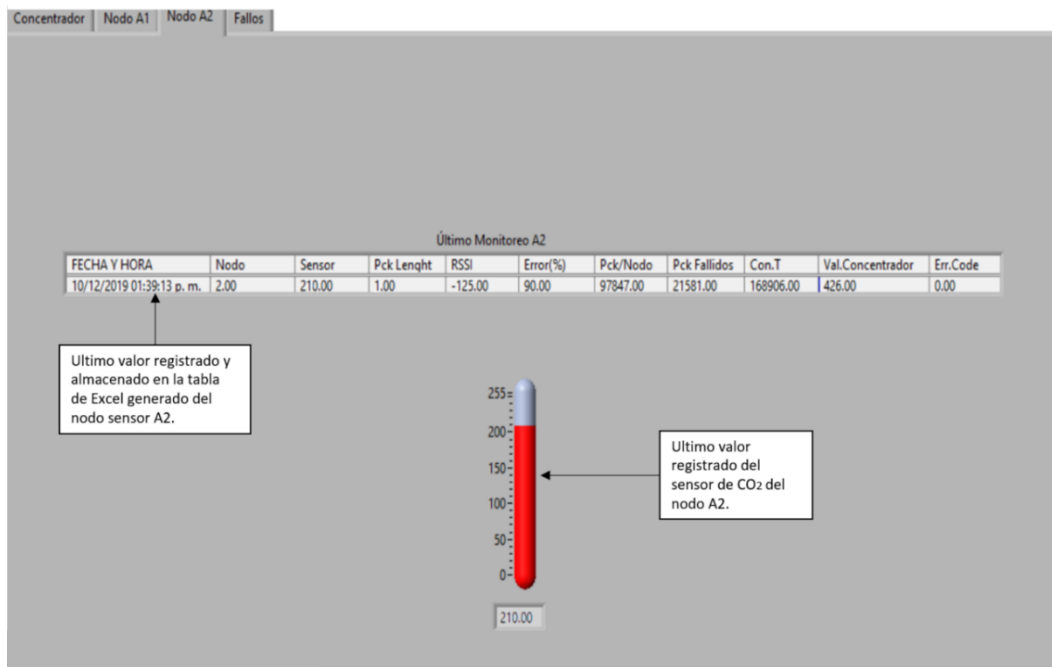


Figura 3.15. Pestaña del nodo 2 en LabVIEW.

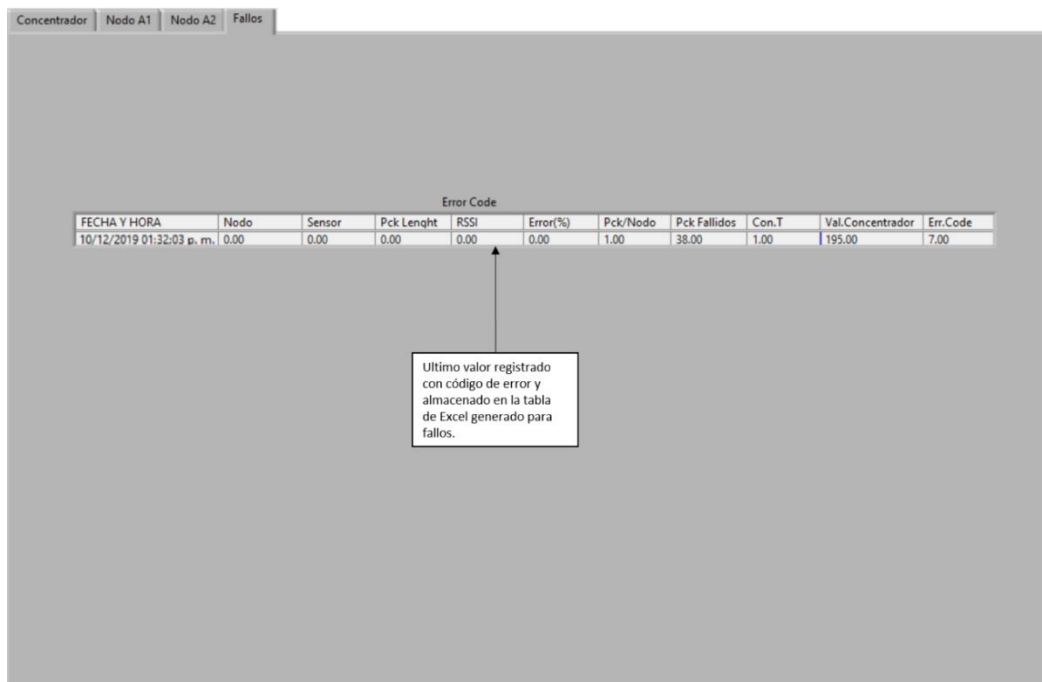


Figura 3.16. Pestaña de paquetes fallidos en LabVIEW.

La aplicación genera 4 archivos Excel correspondientes a las 4 pestañas con el fin de mantener ordenada la información mostrada en la interfaz gráfica. Generar reportes separados por nodo sensor ayuda a filtrar información específica, si es que solo se quiere trabajar con determinado grupo de datos. Además de tener un reporte general y de fallos. En la figura 3.17, se muestran los archivos .csv generados.

Reporte-WSN	10/12/2019 01:40 p. m.	Archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel	15,542 KB
Reporte-WSN-A1	10/12/2019 01:40 p. m.	Archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel	4,441 KB
Reporte-WSN-A2	10/12/2019 01:39 p. m.	Archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel	9,002 KB
Reporte-WSN-Err	10/12/2019 01:40 p. m.	Archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel	2,100 KB

Figura 3.17. Reportes generados.

3.6.3 Sub-VI creados

Se usa NI-VISA, el cual es un controlador de instrumentos de NI que es una implementación del estándar de E/S de Virtual Instrument Software Architecture (VISA). VISA es un estándar para configurar, programar y depurar sistemas de instrumentación que comprenden interfaces GPIB, VXI, PXI, serial (RS232/RS485), Ethernet/LXI y/o interfaces USB [51]. NI-VISA permite la comunicación serial con la tarjeta CC1350.

Se creó un sub-VI que se encarga de extraer los valores leídos del buffer que se encuentran disponibles en el puerto serial. Estos se almacenan en variables globales enteras o varchar dentro de LabVIEW, en la figura 3.18, se muestra el sub-VI llamado Datos-V2 y parte del proceso de lectura del buffer y almacenado en variables globales.

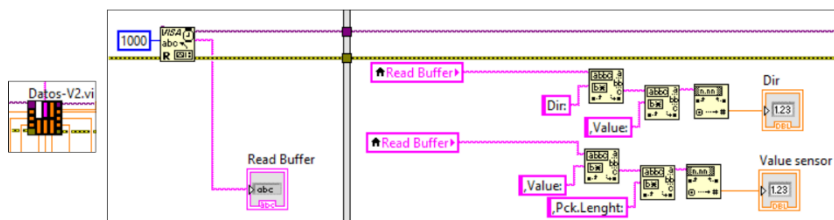


Figura 3.18. Sub-VI Datos-V2.

Las variables globales se ingresan en un generador de tablas, especificando la dirección de almacenado del archivo .csv, como se muestra en la figura 3.19.

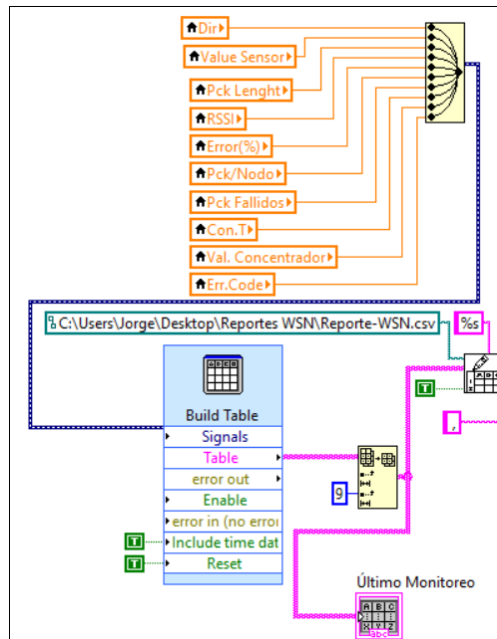


Figura 3.19. Dirección de almacenamiento de reportes.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DE RANGOS DE COMUNICACIÓN

En este capítulo, se describe una serie de pruebas realizadas con los prototipos de nodos sensores en pequeñas redes inalámbricas desplegadas, con el fin de conocer los rangos y alcances aceptables de comunicación en base a la eficiencia de recepción de paquetes entre el nodo receptor y transmisor (punto a punto), teniendo en cuenta la variación de las distancias, el RSSI registrado y el método de alimentación de los nodos.

4.1 Parámetros de comunicación

Texas Instruments cuenta con una herramienta de software llamada smartRF studio, la cual permite a los diseñadores de sistemas con radiofrecuencias evaluar de forma sencilla las primeras etapas en el proceso de diseño de dispositivos RF de baja potencia [52]. Este software se usó para generar las configuraciones de radiofrecuencia de los nodos sensores, simplificando el proceso al permitir cambiar valores de los registros del sistema RF de cualquier tarjeta de TI.

En la figura 4.1, se muestra la ventana de SmartRF studio con un listado de configuraciones típicas para la tarjeta LaunchPad CC1350.

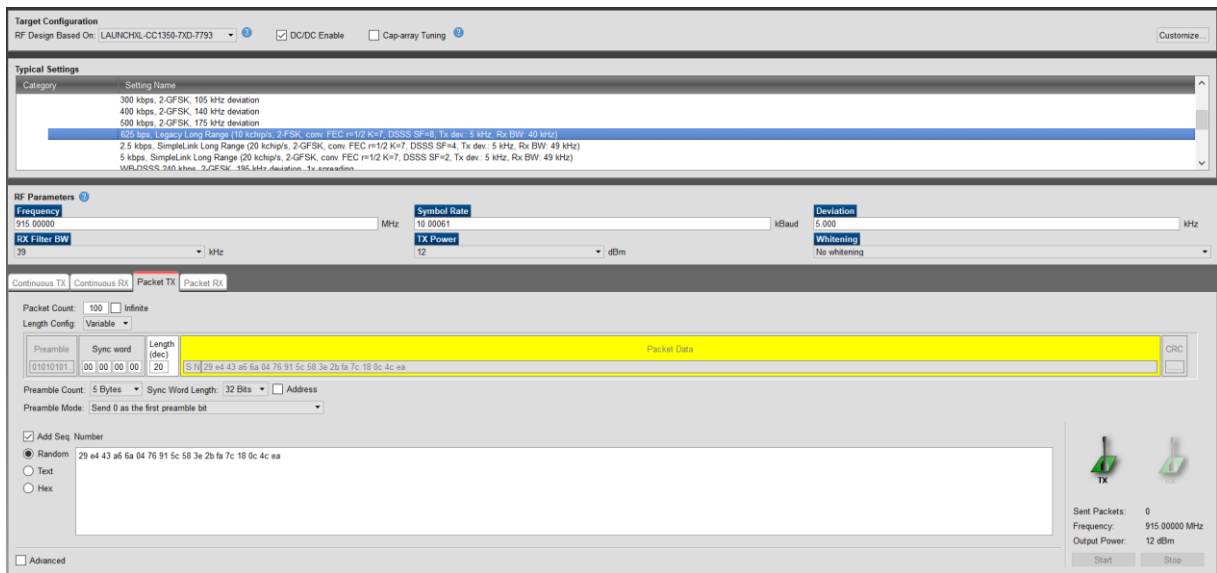


Figura 4.1. SmartRF Studio, configuraciones típicas para tarjeta LaunchPad CC1350.

Para obtener rangos de comunicación lo más extensos posibles con la tarjeta CC1350, se usó el modo Legacy Long Range para realizar las pruebas.

4.1.1 Legacy Long Range

TI Legacy Long Range mode (LRM) es uno de los dos modos de largo alcance propietario de Texas Instruments, el cual utiliza una técnica de codificación para obtener ganancias de sensibilidad y difundir así los bits de información en una serie de símbolos transmitidos, con esta configuración de la capa física se pretende disminuir la velocidad de datos para ganar sensibilidad de transmisión y recepción, este modo presenta un balance razonable entre la tasa baja de transmisión, ganancia en sensibilidad y ancho de banda. Se utiliza en aplicaciones donde no es necesario contar con tasas de transmisión altas y obtener largas distancias de transmisión. En la figura 4.2, se muestra el esquema de codificación de LRM, que consta de tres elementos; el codificador convolucional, el cual es una técnica para determinar errores donde la tasa está dada por el número de entradas sobre el número de salidas (para LRM, 1/2), DSSS, técnica de ensanchamiento de banda de secuencia directa, tiene una secuencia conocida de ensanchamiento por cada bit de información que entra en esta etapa y puede ser de

1, 2, 4, hasta 8 bits de ensanchamiento (DSSS=8) y modulador FSK, es una modulación digital que obtiene el ancho de banda en cuanto a la frecuencia de transmisión [53].

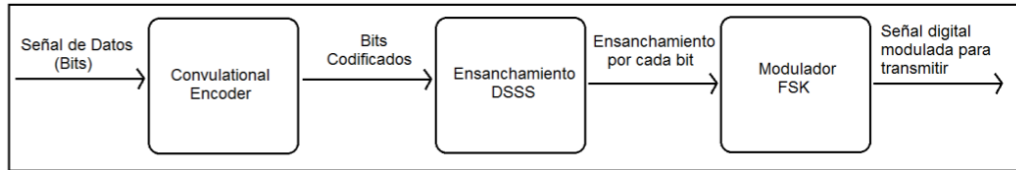


Figura 4.2. Esquema de codificación de LRM.

4.1.2 Valores de parámetros RF establecidos

Se usaron los valores típicos fijos y recomendados para la configuración con el modo Legacy Long Range, estos se pueden ver en la tabla IV.1.

Tabla IV.1. Parámetros de comunicación.

Modo	Legacy Long Range Mode
Frecuencia	915 MHz
Potencia Tx	12 dBm
Ancho de banda	39 kHz
Data Rate	625 bps
Modulación	FSK, DSSS=8

4.2. Uso de archivos generados

SmartRF permite exportar el código generado para el uso de la configuración creada en proyectos externos. En este caso SmartRF genera los archivos fuente con las plantillas

compatibles con el kit de desarrollo para las tarjetas CC1350 mediante la opción de exportar código. En la figura 4.3, se muestra la ventana de SmartRF studio con los códigos de los archivos .c y .h.

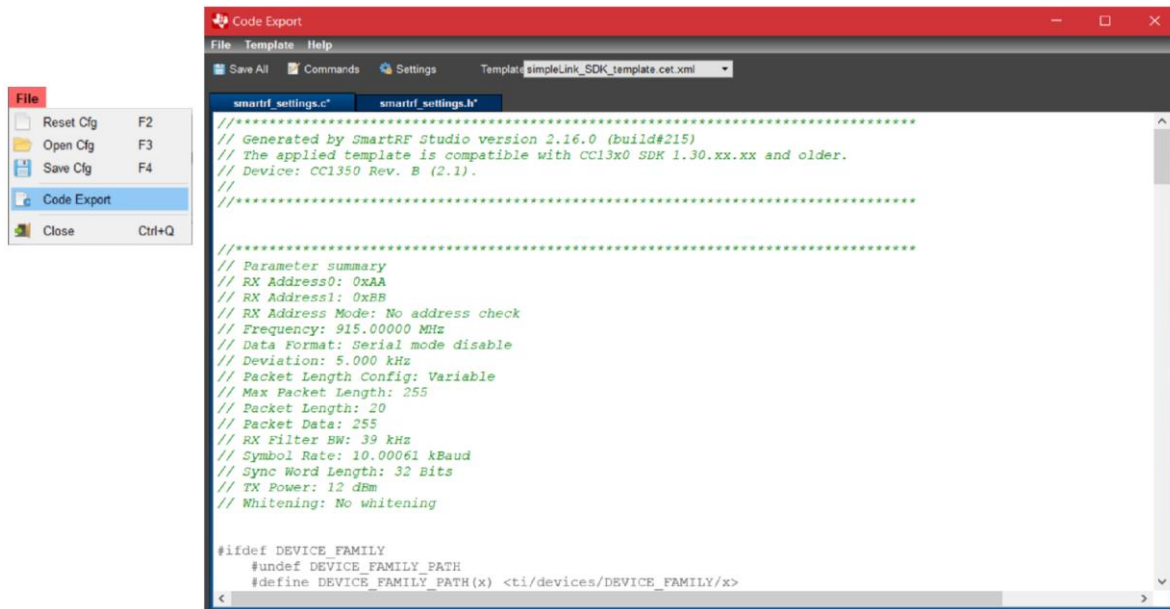


Figura 4.3. Exportar archivos .c y .h

De la plantilla se modifica el formato de las directivas de preprocesador #include, como se muestra en la figura 4.4. Los archivos fuente originales de EasyLink en Energía IDE tienen este formato.

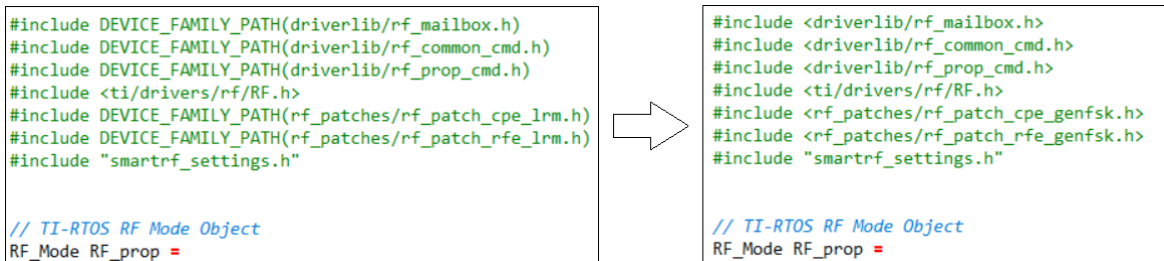


Figura 4.4. Ajustes a los archivos fuente.

Los archivos se sobrescriben en la dirección en donde se encuentran los archivos fuentes originales de EasyLink de Energia IDE. La ruta se muestra en la figura 4.5.

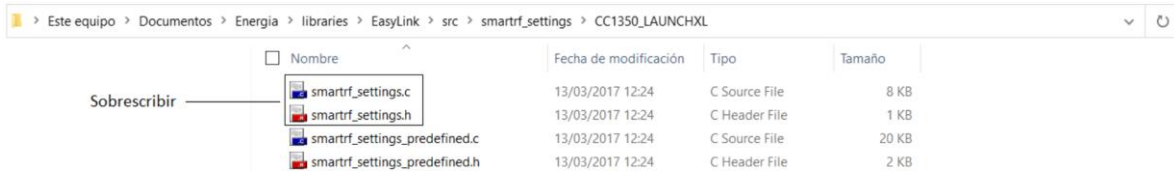


Figura 4.5. Sobrescribir archivos en los archivos fuente de EasyLink

4.3 Primera prueba de rango de comunicación.

La primera prueba se realizó en el Bosque Venustiano Carranza. Se usaron dos nodos, uno receptor y otro transmisor. La prueba consistía en separar progresivamente el nodo transmisor del nodo receptor a una velocidad de caminado normal, y registrar la distancia máxima en donde se haya detectado la recepción de un paquete. En la figura 4.6, se muestra la distancia máxima alcanzada en la recepción de un paquete.

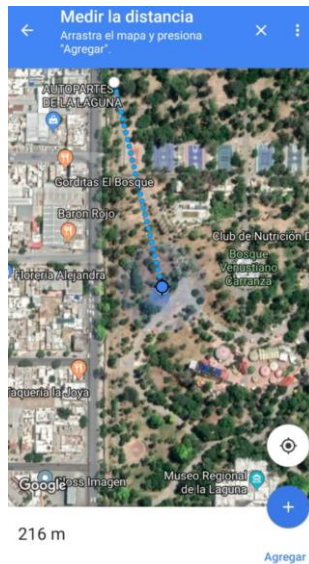


Figura 4.6. Distancia máxima alcanzada.

El nodo transmisor solo avisaba en la terminal de Energía IDE si había enviado un paquete de forma correcta, mientras que el nodo receptor mostraba en la terminal de Energía IDE la recepción correcta del paquete. Se consideró como 200 m la distancia máxima aceptable para realizar pruebas.

4.4 Despliegue de nodos para pruebas de rangos de comunicación.

Las siguientes pruebas de rango de comunicación se realizaron en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Usando 2 nodos sensores, uno como concentrador (receptor) y otro como transmisor y se establecieron 3 distancias fijas de separación entre nodos, a 90 m, 135 m y 200 m, como se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.7. Distancias entre transmisor y receptor, (a) 90 m, (b) 135 m, (c) 200 m.

4.5 Fuentes de alimentación de los nodos

Se usaron 3 formas de alimentación para el nodo transmisor con el fin de observar diferencias, estas se muestran en la tabla IV.2. El nodo concentrador (receptor) se alimentó del puerto USB 3.0 de una laptop.

Tabla IV.2. Alimentación del nodo transmisor [54], [55].

Modelo	Capacidad	Batería	Dimensiones	Peso	Entrada	Salida
P20000D	20000 mAh	Li-ion	163x80.6x23.3 mm	450 g	DC 5V/2.0 A	DC 5V/2.1 A
P5000	5000 mAh	Li-ion	99x43x22 mm	117 g	DC 5V/1.0 A	DC 5V/1.0 A
Puerto USB	--	--	--	--	--	DC 5V/1.0 A

4.6 Datos obtenidos

Los nodos se instalaron a una altura aproximada a los 6 m de altura con el fin de reducir obstáculos físicos durante las transmisiones. Un paquete de 2 Bytes (carga útil) se enviaba cada 2 s. En la tabla IV.3, se muestran los datos obtenidos de las 9 pruebas realizadas, variando la fuente de alimentación y las distancias.

Tabla IV.3. Datos de rango de comunicación.

Prueba	Distancia	Alimentación Transmisor	Altura	Promedio RSSI (dBi)	Paquetes recibidos (#)	Paquetes Enviados (#)	Paquetes recibidos (%)
1	90 m	ADATA P20000D	6 m	-116.42	1137	1200	94.75%
2	90 m	ADATA P5000	6 m	-124.55	1324	1800	73.56%
3	90 m	ADAPTADOR USB	6 m	-116	1798	1800	99.89%
4	135 m	ADATA P20000D	6 m	-123.1	279	285	97.89%
5	135 m	ADATA P5000	6 m	0	0	300	0.00%
6	135 m	ADAPTADOR USB	6 m	-123.5	301	305	98.69%
7	200 m	ADATA P20000D	6 m	-125.29	93	143	65.03%
8	200 m	ADATA P5000	6 m	0	0	180	0.00%
9	200 m	ADAPTADOR USB	6 m	-124.85	165	215	76.74%

4.7 Resultados obtenidos de las pruebas de comunicación

La eficiencia de las comunicaciones punto a punto representada en el porcentaje de paquetes recibidos respecto a los paquetes enviados para cada distancia y método de alimentación energética se muestra en la figura 4.8.

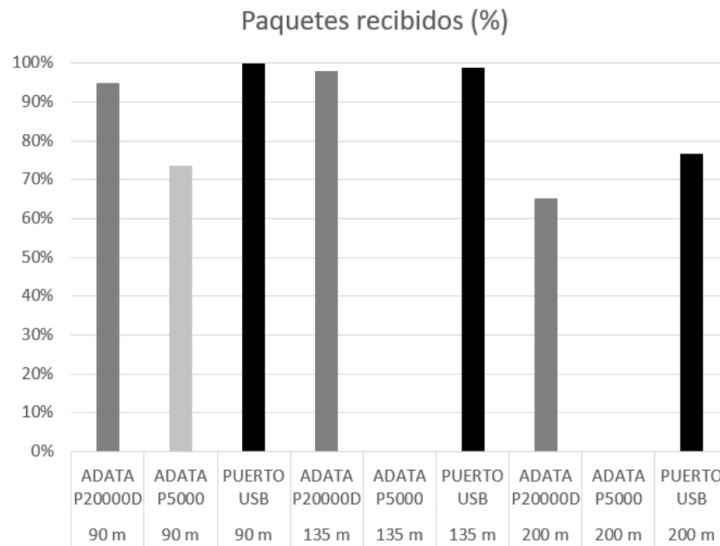


Figura 4.8. Eficiencia de las comunicaciones a diferentes distancias y alimentación.

Se puede observar que para las distancias de 90 m y 135 m tanto la alimentación con la batería externa ADATA P20000D como por puerto USB 3.0, tuvieron un desempeño muy bueno en donde el porcentaje de efectividad en las comunicaciones fueron del 95% y 99% respectivamente. Mientras que la batería externa ADATA P5000 tuvo una efectividad de 75% en 90 m y el 0% a distancias mayores de 135 m. A 200 m tanto la alimentación con la batería externa ADATA P20000D como por puerto USB 3.0, tuvieron un desempeño aceptable del 65% y 77% de eficiencia respectivamente.

El RSSI (Received Signal Strength Indicator) indica el nivel de potencia (intensidad) de las señales recibidas por un dispositivo en una red o comunicación inalámbrica. Es una escala de referencia en relación a 1 mW, donde 0 dBm es igual a 1 mW. Entre más negativo, peor el nivel de intensidad detectado.

$$P(\text{dBm}) = 10 \text{Log} \frac{P(\text{mW})}{1\text{mW}}$$

El RSSI indica la intensidad recibida, y no la calidad de señal. Pero sí permite establecer un nivel de cobertura, y es ampliamente utilizado como método de localización de nodos en

tecnologías con RIS. En la figura 4.9, se muestra una gráfica que muestra el nivel de RSSI a cada distancia y fuente de alimentación.

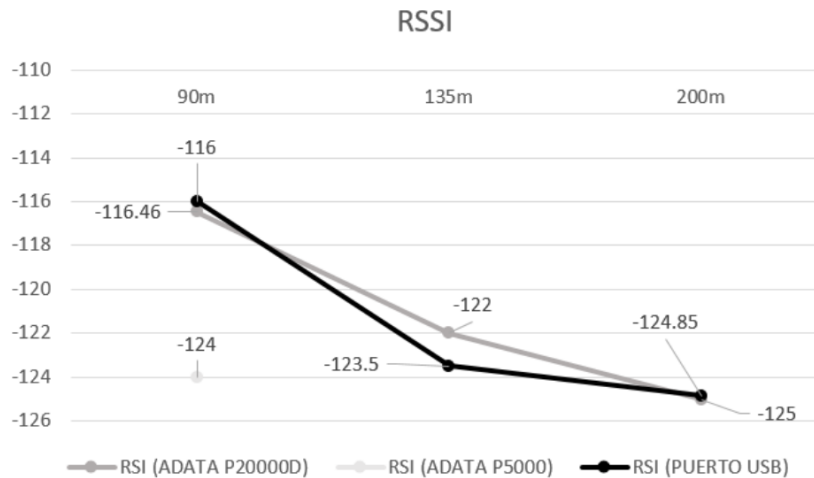


Figura 4.9. RSSI vs distancia.

En la gráfica de la figura 4.9, se puede observar como los niveles de RSSI empeoran a medida que aumenta la distancia, siendo muy similares los niveles detectados del nodo sensor alimentado por la batería externa ADATA P20000D y el puerto USB 3.0. Mientras que el único valor de RSSI registrado del nodo alimentado con la batería ADATA P5000 fue a la distancia de 90 m, siendo este el peor registro de RSSI con cualquier método de alimentación.

En conclusión, gracias a estas pruebas se comprobó que se pueden lograr comunicaciones fiables a distancias de hasta 200 m, y casi perfectas a distancias menores de 135 m si el nodo transmisor se alimenta con fuentes estables como un puerto USB 3.0 o con una batería externa que a su salida disponga DC 5V 2A, como la ADATA P20000D. Para aplicaciones inalámbricas como el monitoreo ambiental donde no es necesaria una comunicación perfecta, como lo pueden ser las transmisiones de contenido multimedia o información de alta seguridad, 200 m de distancia entre nodos resulta una distancia máxima adecuada.

CAPÍTULO 5

SIMULACION DE REDES INALAMBRICAS DE SENSORES: COMPARATIVA EN RANGOS Y EFICIENCIA

En la actualidad, las simulaciones se han convertido en una necesidad para realizar análisis minuciosos e investigaciones en una infinidad de campos. Dentro de las tecnologías inalámbricas, el uso de simuladores principalmente permite el reducir una serie de complicaciones que puedan surgir debido a la inestabilidad en las comunicaciones inalámbricas comparadas con las alámbricas, donde existen diversas consideraciones a tomar en cuenta para que una red inalámbrica resulte exitosa.

Diseñar una red inalámbrica de sensores en un simulador y conocer de antemano el comportamiento aproximado que tendrá la red física es primordial y algo que puede garantizar el éxito de la red. Esto permitirá optimizar recursos y disminuir problemáticas debido al mejor entendimiento durante el proceso de simulación.

En este capítulo se muestra una comparativa entre datos obtenidos por el simulador y datos obtenidos en pruebas con redes inalámbricas de sensores desplegadas. Las simulaciones fueron realizadas con la cama de simulación 3D descrita anteriormente en el capítulo 2, y que mediante el uso de componentes de INET framework se establecieron los protocolos de comunicación inalámbricos y parámetros de radiofrecuencia usados con los prototipos de nodos sensores. La comparativa se centra en evaluar la eficiencia en la recepción de paquetes de las redes simuladas y desplegadas a diferentes distancias, así como con los niveles de RSSI obtenidos.

5.1 Casos comparativos

Se realizaron comparativas para dos configuraciones y parámetros de radiofrecuencias diferentes, tanto en simulación como con los prototipos de nodos sensores. Para cada tipo de configuración o estándar utilizado es un caso diferente. A continuación, se muestran los dos casos comparativos realizados. Para el primero se utilizó el estándar IEEE 802.15.4, estándar ampliamente utilizado en comunicaciones con redes inalámbricas de sensores y para el segundo caso, se utilizó el modo Legacy Long Range propiedad de Texas Instruments, el cual se ha utilizado mayormente en los prototipos de nodos sensores, tanto en pruebas de alcance como en mediciones de ruido.

5.2 Caso 1: IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 define la capa física y el control de acceso al medio (MAC, Media Access Control) de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (LR-WPAN, Low-Rate Wireless Personal Area Network). Administrado por el grupo IEEE 802.15, es un estándar ampliamente utilizado para RIS donde se requiera bajas tasas de transmisión y eficiencia en costos energéticos.

5.2.1 Despliegue de nodos

El concentrador y los nodos sensores fueron colocados tratando de evitar la mayor cantidad de obstáculos físicos dentro del Instituto Tecnológico de la Laguna, las distancias y ubicaciones exactas se muestran en la figura 5.1.



Figura 5.1. Distancias caso 1, (a) Ubicación de nodos en mapa con imagen satelital, (b) Ubicación de nodos en cama de simulación 3D.

En la Figura 5.1(a), se muestra una imagen de referencia con fotografías satelitales tomadas de Google Earth, mientras que en la Figura 5.1(b), se muestran las coordenadas geográficas de posición horizontal exactas de los puntos en donde fueron colocados los nodos dentro del simulador gracias a los módulos de INET framework y el mapa en openstreetmap. Tanto en las simulaciones como en el despliegue de la red, los nodos se encuentran a una altura aproximada de 6 m.

Las pruebas y simulaciones se realizaron punto a punto a distancias de 25 m, 50 m y 100 m entre transmisor y receptor, los nodos transmiten uno a la vez para evitar colisión de paquetes.

En la figura 5.2, se muestran fotografías tanto del nodo concentrador y los nodos transmisores durante las pruebas.



Figura 5.2. Imágenes del despliegue de nodos para el caso 1. (a) Fotografías del Concentrador, (b) Fotografías de los Nodos.

5.2.2 Parámetros IEEE 802.15.4

Texas Instruments tiene su plataforma para el desarrollo de aplicaciones en tarjetas CC13x0 con especificaciones del estándar IEEE 802.15.4 denominado TI 15.4-Stack. Los nodos se configuraron bajo el estándar IEEE 802.15.4 y se usó el modelo 802.15.4 de INET framework para las simulaciones. Tanto los parámetros de los nodos y los simulados se muestran en la Tabla V.1, así como algunas consideraciones ambientales tomadas en cuenta durante la simulación como el ruido ambiental, los objetos físicos y temperatura.

Tabla V.1. Caso 1: Modo estándar IEEE 802.15.4.

	Parámetros del nodo	Parámetros de simulación
Modo	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4
Frecuencia	915 MHz	915 MHz
Potencia Tx	12 dBm	12 dBm
Ancho de banda	98 kHz	98 KHz
Data Rate	50 kbps	50 kbps
Modulación	FSK	FSK
Radiación Antena	isotrópica	isotrópica
Ganancia Antena	2 db	2 db
Altura Nodo	6 m	6 m
Distancia Tx/Rx	25, 50, 100 m	25, 50, 100 m
Background noise	-	-116 dbm
Obstáculos físicos	-	Concreto y follaje
Temperatura ambiental	-	22 °C

5.2.3 Proceso de simulación para caso 1

La simulación inicia al cargar la escena 3D a través de osgEarthScene con el archivo.earth descrito en el capítulo 2, ubicándose en un determinado punto. Se toman en consideración factores como obstáculos físicos, atenuación de la señal de radio y el ruido de fondo, en un área de 300 m x 300 m, se especifican parámetros del nodo y de radiofrecuencia,

y se despliegan de forma estática como se muestra de mejor forma en la Figura 5.1(b). La simulación se realiza durante 3 horas, donde cada nodo transmisor funciona 1 hora enviando paquetes cada 2 segundos. Por último, los resultados se obtienen expresados en paquetes recibidos y niveles de RSSI promedio. El proceso de simulación se muestra de forma simplificada en la figura 5.3.

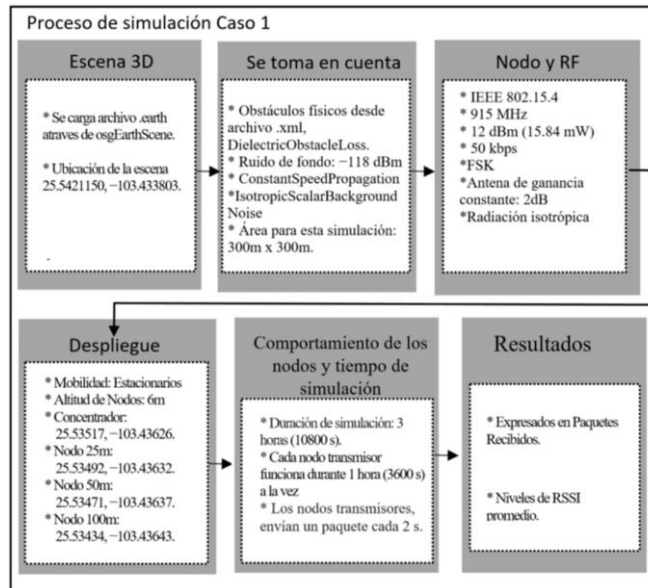


Figura 5.3. Proceso de simulación caso 1: IEEE 802.15.4.

A continuación, se muestra de forma más detallada el proceso de simulación, explicando partes importantes del código en diferentes archivos del modelo de simulación:

1.- La escena 3D se carga desde el archivo .ini de la simulación. El archivo .ini, se cargan las configuraciones y parámetros del modelo de simulación. En la figura 5.4, se muestran en código los parámetros de la simulación referentes a la escena 3D que se carga (archivo “torreon.earth”), la ubicación de la escena, el área de simulación, los obstáculos físicos en simulación (archivo “obstacletorreon.xml”), temperatura y ruido ambiental.

```
# ESCENA
*.osgEarthScene.scene = "torreon.earth"
*.playgroundLatitude = 25.542150
*.playgroundLongitude = -103.433803
*.playgroundWidth = 300m
*.playgroundHeight = 300m

# CONFIGURACIONES AMBIENTALES Y FISICAS
*.physicalEnvironment.coordinateSystemModule = "coordinateSystem"
*.physicalEnvironment.config = xmldoc("obstacleorreon.xml")
*.physicalEnvironment.temperature = 293K #293K=19.85C

# OBSTACULOS
*.radioMedium.obstacleLoss.typename = "DielectricObstacleLoss"
*.radioMedium.backgroundNoise.typename = "IsotropicScalarBackgroundNoise"
*.radioMedium.backgroundNoise.power = -116dBm
```

Figura 5.4. Archivo.ini; escena 3D, ruido ambiental, configuraciones ambientales y físicas.

2.- La estructura del modelo de la red se define en el archivo.ned, en la figura 5.5, se muestran los parámetros y submodulos usados, aquí se declaran los nodos usados en la red como el nodo concentrador y los tres nodos transmisores.

```
parameters:
  @display("bgb=650,500;bgg=100,1,grey95");
  @figure[title](type=label; pos=0,-1; anchor=sw; color=darkblue);
  @figure[rcvdPkText](type=indicatorText; pos=380,20; anchor=w; font=,18; textFormat="packets received: %g"; initialValue=0);
  @statistic[packetReceived](source=concentrador.app[0].packetReceived; record=figure(count),vector?; targetFigure=rcvdPkText);
  @statistic[receptionPower](source="receptionMinSignalPower(radioMedium.signalArrivalStarted)"; record=last, vector);
  @signal[RSSI](type=double);
  @statistic[RSSI];

submodules:
  physicalEnvironment: PhysicalEnvironment {
    @display("p=100,260");
  }
  concentrador: SensorNode {
    @display("p=382,50");
  }
  sensor100m: SensorNode {
    @display("p=382,150");
  }
  sensor50m: SensorNode {
    @display("p=382,250");
  }
  sensor25m: SensorNode {
    @display("p=382,250");
  }
  configurator: Ipv4NetworkConfigurator {
    @display("p=259,150");
  }
  radioMedium: Ieee802154NarrowbandScalarRadioMedium {
    @display("p=258,50");
  }
}
```

Figura 5.5. Archivo .ned; parámetros y submodulos.

3.- La posición exacta de los nodos se declara en el archivo.ini, se expresa que son nodos estacionarios, con sus coordenadas geográficas y altura de los nodos. En la figura 5.6 se muestra esto.

```
# POSICION
*.*.mobility.typename = "StationaryMobility"
*.*.mobility.coordinateSystemModule = "coordinateSystem"
*.concentrador.mobility.initialAltitude = 6m
*.sensor100m.mobility.initialAltitude = 6m
*.sensor50m.mobility.initialAltitude = 6m
*.sensor25m.mobility.initialAltitude = 6m
*.concentrador.mobility.initialLatitude = 25.53517deg
*.concentrador.mobility.initialLongitude = -103.43626deg
*.sensor100m.mobility.initialLatitude = 25.53434deg
*.sensor100m.mobility.initialLongitude = -103.43643deg
*.sensor50m.mobility.initialLatitude = 25.53471deg
*.sensor50m.mobility.initialLongitude = -103.43637deg
*.sensor25m.mobility.initialLatitude = 25.53492deg
*.sensor25m.mobility.initialLongitude = -103.43632deg
```

Figura 5.6. Archivo.ini; posición de los nodos y tipo de movimiento.

4.- Los parámetros de radiofrecuencia y antenas se establecen en el archivo.ini. En la figura 5.7(a), se muestran los parámetros en simulación y en la figura 5.7(b), se muestran los parámetros de radiofrecuencia de SmartRF para el estándar IEEE 802.15.4.

(a) Archivo.ini, parametros radio y antena

```
# RADIO Y ANTENAS
**.wlan[0].typename = "Ieee802154NarrowbandInterface"
**.wlan[0].radio.typename = "Ieee802154NarrowbandScalarRadio"
**.wlan[0].mac.typename = "Ieee80215Mac"
**.wlan[0].mac.bitrate = 50000bps
**.wlan[0].radio.antenna.typename = "ConstantGainAntenna"
**.wlan[0].radio.antenna.gain = 2dB
**.wlan[0].radio.transmitter.power = 0.015W #12dbm
**.wlan[0].radio.displayCommunicationRange = true
**.wlan[0].radio.bandwidth = 98kHz
**.wlan[0].radio.carrierFrequency = 915MHz
**.wlan[0].radio.displayInterferenceRange = true
**.wlan[0].radio.receiver.ignoreInterference = false
```

(b) Tarjeta CC1350, parametros SmartRF

The screenshot shows the 'Typical Settings' window for a CC1350 card. It lists various modulation and coding schemes (MCS) for the 779-930 MHz band, such as 50 kbps 2-GFSK, 1.2 kbps 2-GFSK, etc. Below this, the 'RF Parameters' section is visible, showing a Frequency of 915.00000 MHz, Symbol Rate of 50.00000 kBaud, RX Filter BW of 98 kHz, and TX Power of 12 dBm.

Figura 5.7. Parámetros de radiofrecuencia, (a) archivo.ini, (b) SmartRF.

5.- Los nodos transmisores tiene como único destino al nodo llamado concentrador, envían paquetes de 2 Bytes cada 2 s. El receptor llamado concentrador funciona como acumulador de paquetes recibidos. En la figura 5.8, se muestra el código referente a la transmisión y receptor en el archivo.ini.

```
# TRANSMISION
*.sensor*.app[*].typename = "UdpBasicApp"
*.sensor*.app[*].destAddresses = "concentrador"
*.sensor*.app[*].destPort = 1000
*.sensor*.app[*].sendInterval = 2s
*.sensor*.app[*].startTime = uniform(0s,1s)
*.sensor*.app[*].messageLength = 2Byte
*.sensor*.app[*].packetName = "SensorData"

# RECEPTOR
*.concentrador.numApps = 1
*.concentrador.app[0].typename = "UdpSink"
*.concentrador.app[0].localPort = 1000
```

Figura 5.8. Archivo.ini; receptor y transmisor.

6.- Una vez concluida la simulación, los resultados se pueden consultar en la carpeta del proyecto. En la figura 5.9, se muestran los archivos de resultados generados.

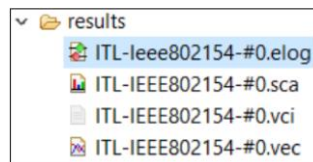


Figura 5.9. Carpeta resultados del proyecto de simulación.

7.- Los paquetes recibidos por el nodo concentrador se consultan en el archivo.anf a partir de los archivos generados. Se consultan y guardan los paquetes recibidos en la sección de vectores o escalares como se muestra en la figura 5.10.

(a) Vector

lee802154.concentrador.udp	
packetReceived:vector(packetBytes) (vector)	10.0 (369)
passedUpPkvector(count) (vector)	85.0 (369)

(b) Escalar

lee802154.concentrador.udp	
packetReceived:count (scalar)	369.0

Figura 5.10. Paquetes recibidos, (a) Vector, (b) Escalar.

En la figura 5.11, se muestran los paquetes recibidos durante simulación en tiempo real.



Figura 5.11. Escalar de paquetes recibidos durante simulación.

8.- El valor RSSI se puede consultar igualmente en los archivos generados de resultados, como se muestra en la figura 5.12. ReceptionPower:last almacena el valor final registrado del nivel de potencia en Watts durante la recepción.

lee802154.receptionPower:last (LastValueRecorder) receptionPower:last = 3.16227e-016
--

Figura 5.12. Potencia de recepción.

5.3 Caso 2: Legacy Long Range

Como ya se describió en el capítulo anterior referente a las pruebas de rangos de comunicación, el Legacy Long Range Mode (LRM) presenta un balance entre la tasa baja de transmisión, la ganancia en sensibilidad y el ancho de banda, se utiliza en aplicaciones donde no es necesario contar con tasas de transmisión altas y fue desarrollada por TI con el fin de obtener largas distancias de transmisión, a velocidades de transmisión bajas.

5.3.1 Despliegue de nodos

El concentrador y los nodos sensores fueron colocados tratando de evitar la mayor cantidad de obstáculos físicos dentro del Instituto Tecnológico de la Laguna, las distancias y ubicaciones exactas se muestran en la figura 5.13.

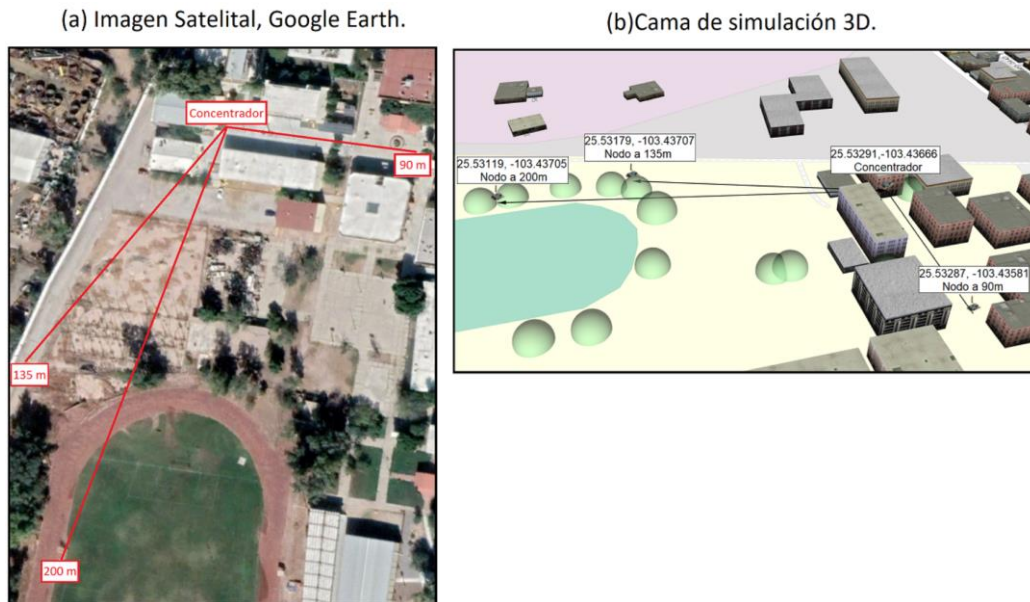


Figura 5.13. Distancias caso 2, (a) Ubicación de nodos en mapa con imagen satelital, (b) Ubicación de nodos en cama de simulación 3D.

En la figura 5.13(a), se muestra una imagen de referencia con fotografías satelitales tomadas de Google Earth, mientras que en la figura 5.13(b), se muestran las coordenadas

geográficas de posición horizontal exactas de los puntos en donde fueron colocados los nodos dentro del simulador gracias a los módulos de INET framework y el mapa en openstreetmap. Tanto en las simulaciones como en el despliegue de la red, los nodos se encuentran a una altura aproximada de 6 m.

Las pruebas y simulaciones se realizaron punto a punto a distancias de 90 m, 135 m y 200 m entre transmisor y receptor, mismas distancias que se vieron en el capítulo anterior referente a los rangos de comunicación, los nodos transmiten uno a la vez para evitar colisión de paquetes.

En la figura 5.14, se muestran fotografías tanto del nodo concentrador y los nodos transmisores durante las pruebas.



Figura 5.14. Imágenes del despliegue de nodos para el caso 1. (a) Fotografía del Concentrador, (b) Fotografías de los Nodos.

5.3.2 Parámetros Long Range Mode

Tanto los parámetros de los prototipos de nodos y los nodos simulados, así como algunas consideraciones ambientales tomadas en cuenta durante la simulación como el ruido ambiental, los objetos físicos y temperatura se muestran en la Tabla V.2.

Tabla V.2. Caso 2: Modo Legacy Long Range.

	Parámetros del nodo	Parámetros de simulación
Modo	Long Range Mode	-
Frecuencia	915 MHz	915 MHz
Potencia Tx	12 dBm	12 dBm
Ancho de banda	39 kHz	39 KHz
Data Rate	625 bps	625 bps
Modulación	FSK, DSSS=8	FSK, DSSS=8
Radiación Antena	isotrópica	isotrópica
Ganancia Antena	2 db	2 db
Altura Nodo	6 m	6 m
Distancia Tx/Rx	90, 135, 200	90, 135, 200
Background noise	-	-116 dbm
Objetos físicos	-	Concreto y follaje
Temperatura ambiental	-	19 °C

Al ser el modo Legacy Long Range propietario de TI y no un estándar, INET no cuenta con un módulo específico para esa configuración. En la simulación, a forma de aproximación, se usaron los mismos parámetros RF del modo LRM, la misma modulación de espectro ensanchado por secuencia directa y el mismo tamaño del paquete transmitido.

5.3.3 Proceso de simulación para caso 2

El proceso de simulación es igual al del caso 1. En la figura 5.15, se muestra de forma simplificada el proceso de simulación.

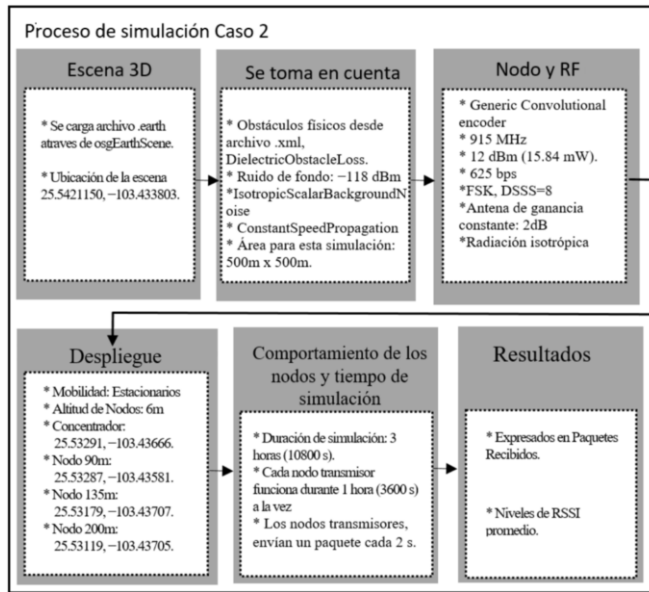


Figura 5.15. Proceso de simulación caso 2: Legacy Long Range.

A continuación, se muestra de forma más detallada el proceso de simulación para el caso 2:

1.- La escena 3D, la ubicación de la escena, el área de simulación, temperatura, ruido ambiental y obstáculos físicos en simulación para el caso 2 expresados en el archivo.ini se muestran en la figura 5.16.

```
# ESCENA
*.osgEarthScene.scene = "torreon.earth"
*.playgroundLatitude = 25.542150
*.playgroundLongitude = -103.433803
*.playgroundWidth = 500m
*.playgroundHeight = 500m

# CONFIGURACIONES AMBIENTALES Y FISICAS
*.physicalEnvironment.coordinateSystemModule = "coordinateSystem"
*.physicalEnvironment.config = xmldoc("obstacletorreon.xml")
*.physicalEnvironment.temperature = 293K #293K=19.85C

# OBSTACULOS
*.radioMedium.obstacleLoss.typename = "DielectricObstacleLoss"
*.radioMedium.backgroundNoise.typename = "IsotropicScalarBackgroundNoise"
*.radioMedium.backgroundNoise.power = -116dBm
```

Figura 5.16. Archivo .ini; escena 3D, ruido ambiental, configuraciones ambientales y físicas.

2.- La estructura del modelo de la red se define en el archivo.ned. En la figura 5.17, se muestran los parámetros y submodulos usados.

```
parameters:
  @display("bgb=650,500;bgg=100,1,grey95");
  @figure[title](type=label; pos=0,-1; anchor=sw; color=darkblue);
  @figure[rcvdPkText](type=indicatorText; pos=380,20; anchor=w; font=,18; textFormat="packets received: %g"; initialValue=0);
  @statistic[packetReceived](source=concentrador.app[0].packetReceived; record=figure(count),vector?; targetFigure=rcvdPkText);
  @statistic[receptionPower](source="receptionMinSignalPower(radioMedium.signalArrivalStarted)"; record=last, vector);
  @signal[RSSI](type=double);
  @statistic[RSSI];

submodules:
  physicalEnvironment: PhysicalEnvironment {
    @display("p=100,260");
  }
  concentrador: SensorNode {
    @display("p=382,50");
  }
  sensor200m: SensorNode {
    @display("p=382,150"); //150
  }
  sensor135m: SensorNode {
    @display("p=382,250");
  }
  sensor90m: SensorNode {
    @display("p=382,350");
  }
  configurator: Ipv4NetworkConfigurator {
    @display("p=259,150");
  }
}
```

Figura 5.17. Archivo .ned; parámetros y submodulos.

3.- La posición exacta de los nodos se declara en al archivo.ini y se muestra en la figura 5.18, para el caso 2.

```
# POSICION
*.*.mobility.typename = "StationaryMobility"
*.*.mobility.coordinateSystemModule = "coordinateSystem"
*.concentrador.mobility.initialAltitude = 6m
*.sensor200m.mobility.initialAltitude = 6m
*.sensor135m.mobility.initialAltitude = 6m
*.sensor90m.mobility.initialAltitude = 6m
*.concentrador.mobility.initialLatitude = 25.5329deg
*.concentrador.mobility.initialLongitude = -103.43666deg
*.sensor200m.mobility.initialLatitude = 25.53119deg
*.sensor200m.mobility.initialLongitude = -103.43705deg
*.sensor135m.mobility.initialLatitude = 25.53179deg
*.sensor135m.mobility.initialLongitude = -103.43707deg
*.sensor90m.mobility.initialLatitude = 25.53287deg
*.sensor90m.mobility.initialLongitude = -103.4358deg
```

Figura 5.18. Archivo .ini; posición de los nodos y tipo de movimiento.

4.- Los parámetros de radiofrecuencia y antenas se establecen en el archivo.ini. En la figura 5.19(a), se muestran los parámetros en simulación y en la figura 5.19(b), se muestran los parámetros de radiofrecuencia de SmartRF para el modo Legacy Long Range.

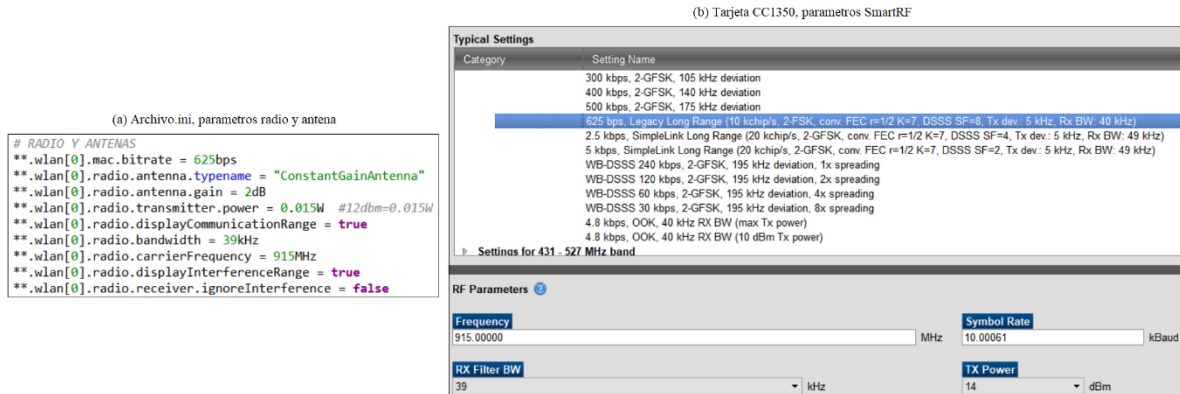


Figura 5.19. Parámetros de radiofrecuencia, (a) archivo.ini, (b) SmartRF.

5.- Los nodos transmisores tienen como único destino al nodo llamado concentrador, envían paquetes de 2 Bytes cada 2 segundos. El receptor llamado concentrador funciona como acumulador de paquetes recibidos. En la figura 5.20, se muestra el código referente a la transmisión y receptor en el archivo.ini.



Figura 5.20. Archivo.ini; receptor y transmisor.

6.- De igual forma que para el caso 1, los resultados tanto de los paquetes recibidos y el nivel de potencia detectado durante la transmisión para la simulación del caso 2 se pueden ver en la carpeta de resultados. En la figura 5.21, se muestran los archivos generados al finalizar la simulación.

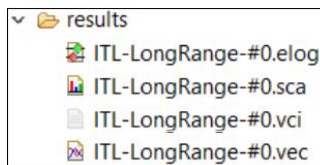


Figura 5.21. Carpeta resultados del proyecto de simulación.

5.4 Discusión y análisis de resultados

Este análisis de resultados se centra en la obtención de la eficiencia de la comunicación, que es expresada en porcentajes de paquetes recibidos para cada nodo y caso presentado, además de observar el comportamiento del nivel de RSSI promedio detectado. Para comprender un poco mejor los resultados es conveniente describir el proceso para la obtención de estos porcentajes. Los nodos de la RIS transmiten un paquete (carga útil de 2 Bytes) cada 2 s durante 1 h bajo ninguna condición, nunca transmitiendo más de un nodo al mismo tiempo, la información que envían son lecturas de CO₂. Cada que se envía un paquete este se contabiliza, aumentando un contador. El concentrador se encarga de recibir el paquete y validar su estatus, si el paquete se recibe de manera satisfactoria incrementa un contador de paquetes recibidos y el nivel de RSSI detectado, esta información se almacena en una base de datos, junto con las lecturas de CO₂ y el identificador del nodo transmisor. A partir de los paquetes contabilizados es como se obtienen los porcentajes de paquetes recibidos, que se muestran más adelante. En las simulaciones, al igual que las RIS desplegadas, los nodos transmiten con la misma frecuencia y tiempo de duración al concentrador, los paquetes enviados se contabilizan y quedan registrados en un escalar de la capa de aplicación de cada nodo, el concentrador contabiliza los paquetes recibidos satisfactoriamente y se almacenan en un escalar de la capa de aplicación, a partir de estos

paquetes contabilizados se obtiene el porcentaje de paquetes recibidos por el concentrador. Por otro lado, el RSSI promedio se obtiene de un vector que representa el nivel de RSSI registrado durante la simulación en la capa de aplicación del concentrador. En función a lo anterior, en la figura 5.22, se muestra la eficiencia de la comunicación expresada en porcentajes de paquetes recibidos para cada nodo a diferentes distancias y el comportamiento del RSSI promedio medido para cada configuración.

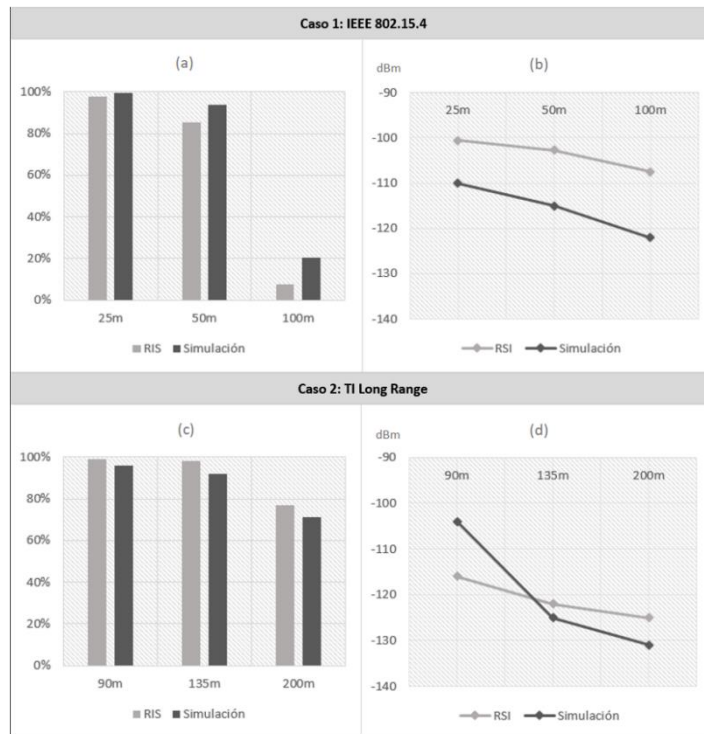


Figura 5.22. Paquetes recibidos y RSSI obtenidos en RIS y simulación.

La figura 5.22(a) y figura 5.22(b), corresponden al modo con la configuración IEEE 802.15.4, la figura 5.22(a), muestra el porcentaje de paquetes recibidos por el nodo receptor o concentrador de un total de 1800 paquetes enviados por el nodo transmisor en las tres diferentes distancias. A 25 m la recepción de paquetes es la mejor debido a la cercanía con el concentrador, donde el 97.5% de paquetes fueron recibidos, en la simulación el 99.5% de paquetes fueron

recibidos, a 50 m los paquetes recibidos disminuyen a un 86.5% y 93.6% en la simulación, en cuanto al nodo a 100 m de distancia se observa el peor escenario con una disminución de paquetes recibidos del 7.5% y 20.4% respectivamente.

Para fines prácticos y observar de mejor forma la discrepancia entre datos de la RIS y los simulados se realiza un promedio general de los porcentajes de paquetes recibidos de las tres distancias obteniendo un 63.5% de las RIS contra un 71.2% obtenido en simulaciones. En otras palabras, se puede decir que los datos arrojados por los nodos y los datos de las simulaciones discrepan un 7.7% (92.3% de coincidencia). Siendo los 100 m donde hubo mayor diferencia entre datos obtenidos por nodos y simulados, y 25 m donde hubo menor diferencia. En cuanto al RSSI se observa que el nivel de intensidad decae a mayor distancia tanto en la RIS como en las simulaciones, un promedio de 12.1 dBm de diferencia, obteniendo niveles de intensidad peores en las simulaciones. Tanto la figura 5.22(c) y figura 5.22(d) corresponden al modo TI Legacy Long Range. En la figura 5.22(c), se muestra el porcentaje de paquetes recibidos de un total de 1800 paquetes enviados en cada una de las tres diferentes distancias, a 90 m el concentrador recibió el 99% de los paquetes y un 96% de paquetes fueron recibidos en simulación, a 135 m cae a 98% y 92%, respectivamente, y por último a 200 m un 77% y 71%, esta fue la distancia con peor recepción. Para esta configuración los datos arrojados por los nodos y las simulaciones discrepan un 5% (95% de coincidencia). Por último, en la figura 5.22(d), se muestra como el nivel del RSSI medido disminuye en intensidad conforme la distancia es mayor, con un promedio de 7 dBm de diferencia.

Si bien estas pruebas y simulaciones de comunicación entre nodos son simples, nos permiten observar que la eficiencia de las redes y el nivel de intensidad de energía en la señal durante la recepción de los paquetes para las dos configuraciones se comportan dentro de lo esperado al variar la distancia entre nodos, tanto los datos obtenidos por los nodos como los simulados muestran que la eficiencia de la red decae conforme se incrementa la distancia, al igual el nivel de RSSI promedio detectado es más débil conforme la distancia es mayor. Que haya un comportamiento con alta similitud entre los datos obtenidos de las RIS y los simulados, con una discrepancia de entre el 5% y 8%, nos dan certeza sobre el uso futuro de la cama de simulación 3D para el diseño de redes más complejas.

CAPÍTULO 6

MEDICIONES DE RUIDO DE FONDO

Antes de diseñar, implementar y desplegar una Red Inalámbrica de Sensores para una aplicación en un ambiente urbano real, se espera conocer el entorno ambiental de la red y su estado, respecto a la propagación de las señales de radio. Diversos factores tienen efecto en la calidad de enlaces de radio, como pueden ser la potencia de transmisión RF, la distancia de comunicación y el ruido ambiental de fondo aleatorio [56]. Estos factores tienen gran impacto en la eficiencia de una red inalámbrica: Por lo tanto, es indispensable tenerlos en cuenta. Sin embargo, se debe tener una principal atención en el ruido ambiental de fondo, debido a que es factor variable y poco controlable. Además, es un parámetro importante en considerar al momento de realizar simulaciones con la cama de simulación 3D desarrollada.

En este capítulo, se describen las mediciones de ruido ambiental de fondo realizadas con los nodos prototipos de prueba y el análisis de estas mediciones en el impacto que tiene en la recepción de paquetes y eficiencia de las redes desplegadas.

6.1 Ruido de radio de fondo

En comunicaciones de radio, el ruido de radio de fondo son señales eléctricas de radiofrecuencia aleatorias las cuales son no deseadas, presentes en un receptor de radio además de la señal de radio deseada. Este ruido siempre está presente en mayor o menor medida debido a una combinación de ruido atmosférico electromagnético natural creado por procesos eléctricos en la atmósfera como relámpagos o por interferencias de radiofrecuencia artificial de otros dispositivos eléctricos captados por la antena del receptor y ruido térmico presente en los circuitos de entrada del receptor. El ruido de fondo no lleva información y es susceptible a superponerse o combinarse con una señal útil [57].

6.2 Pruebas de eficiencia y RSSI medido

Se desplegó una red inalámbrica de sensores durante 10 días con el fin de monitorear las concentraciones de CO₂ en el aire dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de la Laguna, cerca de las vías Boulevard Revolución y calle Niños Héroes en diciembre del año 2019. En la figura 6.1, se muestran las ubicaciones de los nodos.



Figura 6.1. Ubicación de los nodos de la red.

Las ubicaciones se eligieron debido a la cercanía con las vías antes mencionadas y que se encontraban postes de luz dentro del rango de comunicación de las tarjetas, el cual es de 200 m. En la figura 6.2, se muestran los lugares de instalación de los nodos.



Figura 6.2. Nodo Tx1: Blvd. Revolución, Concentrador, Nodo Tx2: Calle Niños Héroes.

El concentrador se desplegó al costado de la caseta de vigilancia donde se instaló una computadora con los programas descritos en capítulos anteriores para la generación de reportes. El Nodo Tx1: Blvrd. Revolución, ubicado a una distancia aproximada de 110 m del concentrador se alimentó con dos baterías externas ADATA P20000D, intercalándolas para su carga (cada 24 horas aproximadamente), el uso de baterías es debido a la falta de una fuente de energía constante cercana de alimentación, mientras que el Nodo Tx2: Niños Héroes ubicado aproximadamente a 100 m del concentrador se alimentó de una toma de corriente eléctrica extraída del poste de luz en donde fue instalado. Los parámetros de comunicación son los que se expresan en la tabla VI.1, para los 3 nodos.

Tabla VI.1. Parámetros de comunicación.

Modo	Legacy Long Range Mode
Frecuencia	915 MHz
Potencia Tx	12 dBm
Ancho de banda	39 kHz
Data Rate	625 bps
Modulación	FSK, DSSS=8

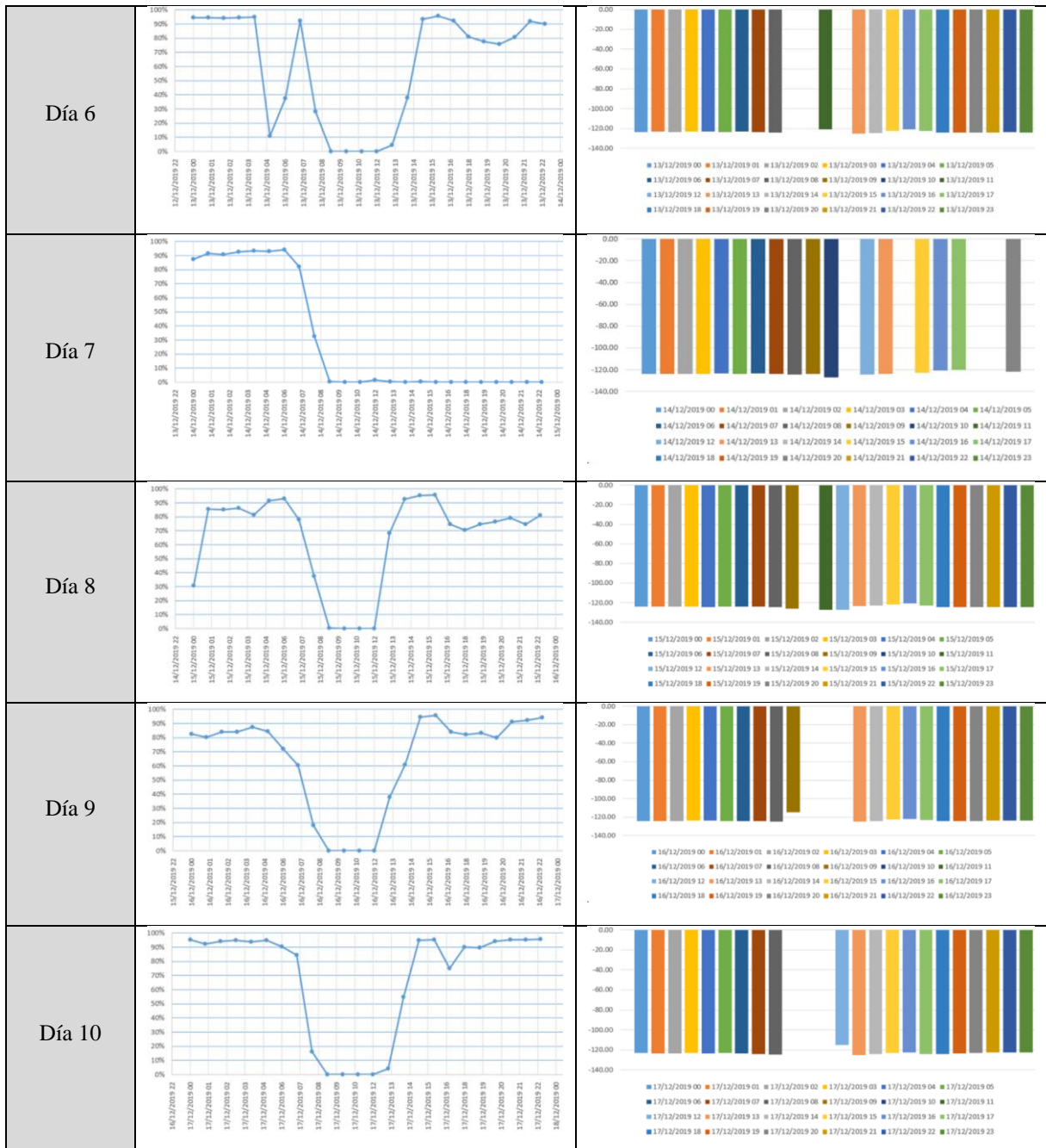
Cada Nodo Tx transmitía la información del valor de CO₂ detectado en paquetes de 2 Bytes de carga útil, cada 2 s de forma no sincronizada. El concentrador recibía la información de ambos nodos Tx y generando reportes separados para cada Nodo sensor Tx. Las siguientes tablas corresponden a aspectos relacionados con la comunicación de la red. La información referente a los niveles de CO₂ se encuentra en el trabajo “Diseño de nodo sensor de CO₂ para monitoreo ambiental” [39].

En la tabla VI.2, se muestran las gráficas del porcentaje de paquetes recibidos y el promedio del RSSI del paquete detectado por cada hora del día del experimento, a lo largo de 10 días, referentes al Nodo Tx1: Blvrd. Revolución, alimentando por las baterías externas.

Tabla VI.2. Porcentaje de paquetes recibidos y RSSI detectado en paquetes recibidos del NodoTx1.

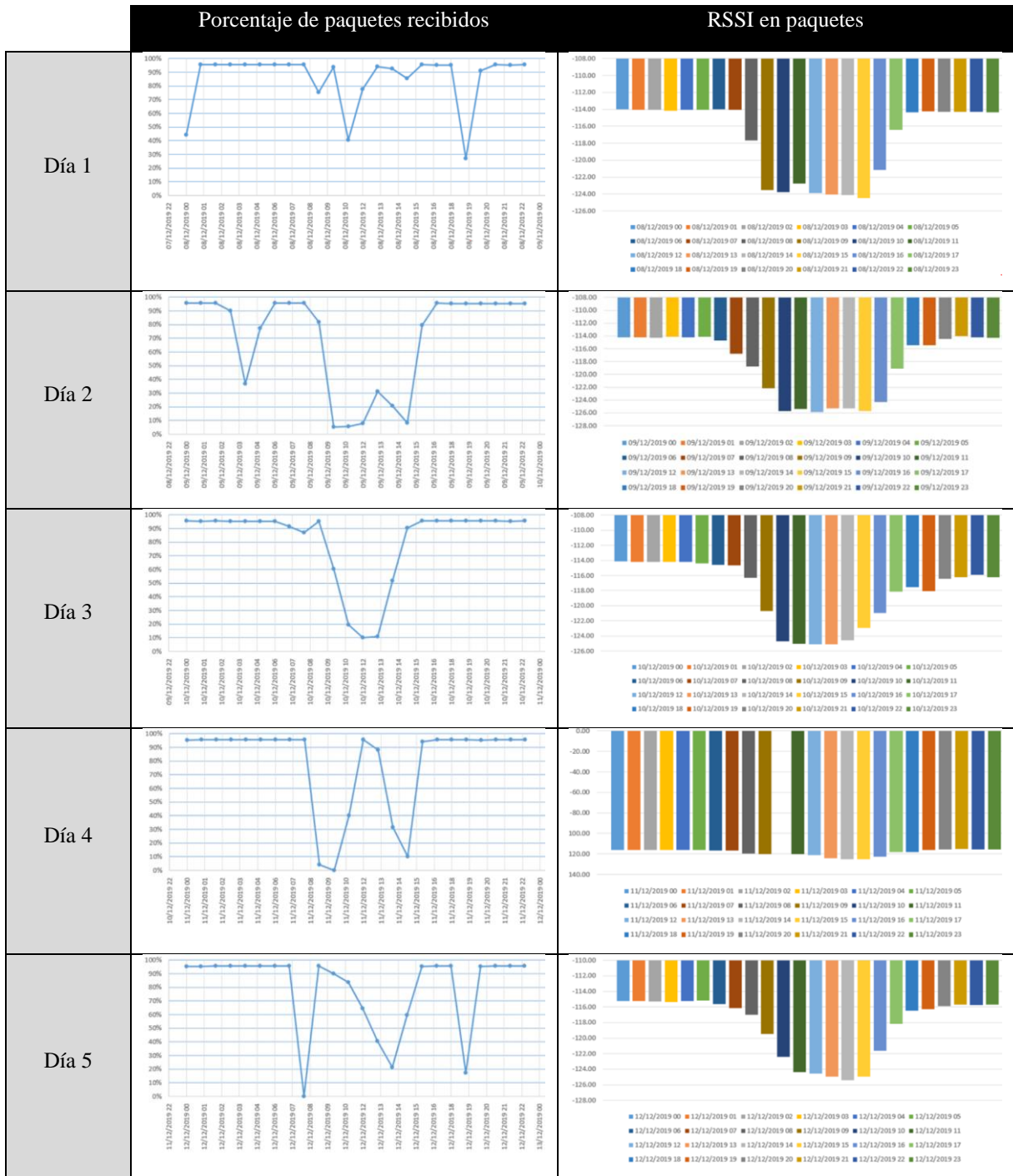


Mediciones de ruido de fondo

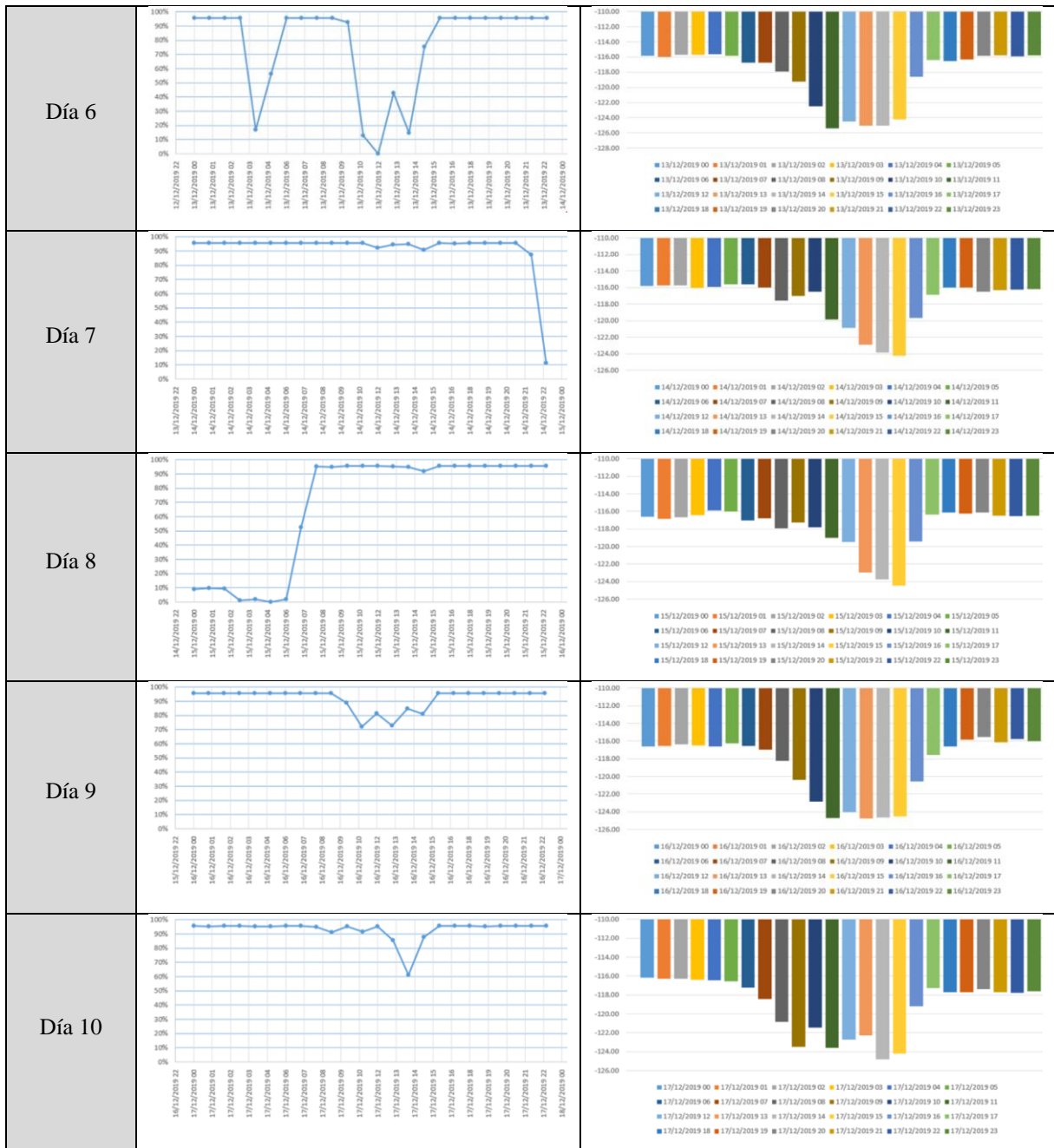


En la tabla VI.3, se muestran las gráficas de porcentaje de paquetes recibidos y el promedio de RSSI del paquete recibido por cada hora del día del experimento, a lo largo de los 10 días, referente al Nodo Tx2: Niños Heroes, alimentado con fuente constante por toma eléctrica.

Tabla VI.3. Porcentaje de paquetes recibidos y RSSI detectado en paquetes recibidos del NodoTx2.



Mediciones de ruido de fondo



Los nodos estuvieron transmitiendo paquetes durante los 10 días, obteniendo las gráficas mostradas en las tablas anteriores. Para la obtención del porcentaje de paquetes recibidos se tomó en cuenta la cantidad de paquetes enviados por el nodo transmisor y la contabilización de

los paquetes recibidos por el concentrador para ese nodo en particular, con esto se obtuvo un porcentaje por cada hora gracias a la asignación de fecha y hora en la generación de reportes por parte de LabVIEW. Mientras que para las gráficas de RSSI detectado se obtuvieron las gráficas con un valor promedio de RSSI por cada hora.

Los resultados tanto de porcentaje de paquetes recibidos y del RSSI detectado varían mucho entre los dos nodos transmisores, esto debido posiblemente al método de alimentación del nodo.

En las gráficas del nodo Tx1, se puede observar que hay horas del día que el nodo concentrador no recibe paquetes de este nodo, y por lo tanto tampoco se obtenía el valor del RSSI, sucediendo esto en los 10 días de prueba, debido principalmente a que a partir de ciertas horas de funcionamiento del nodo, la batería bajaba su rendimiento debido a la descarga de energía y las temperaturas al exterior. Analizando las gráficas del RSSI se puede observar que aproximadamente a partir de las 10 am hasta las 3 pm no se recibía ningún paquete que actualiza el nivel de RSSI durante esas horas y coinciden que a esa hora se hacía el intercambio de baterías.

Con las gráficas del nodo Tx2, se pueden obtener conclusiones más interesantes debido a que se contaba con una alimentación estable. Durante prácticamente todo el transcurso de las pruebas no existió la falta de paquetes que actualizaran los niveles de RSSI en la recepción. Se puede observar una posible relación entre el porcentaje de paquetes recibidos y el nivel de RSSI detectado. En las gráficas se observa que el RSSI empeora en horas en donde el porcentaje de paquetes recibidos decaen. En figura 6.3, se muestran algunas graficas de interés donde se observa de mejor manera lo que se menciona.

Mediciones de ruido de fondo

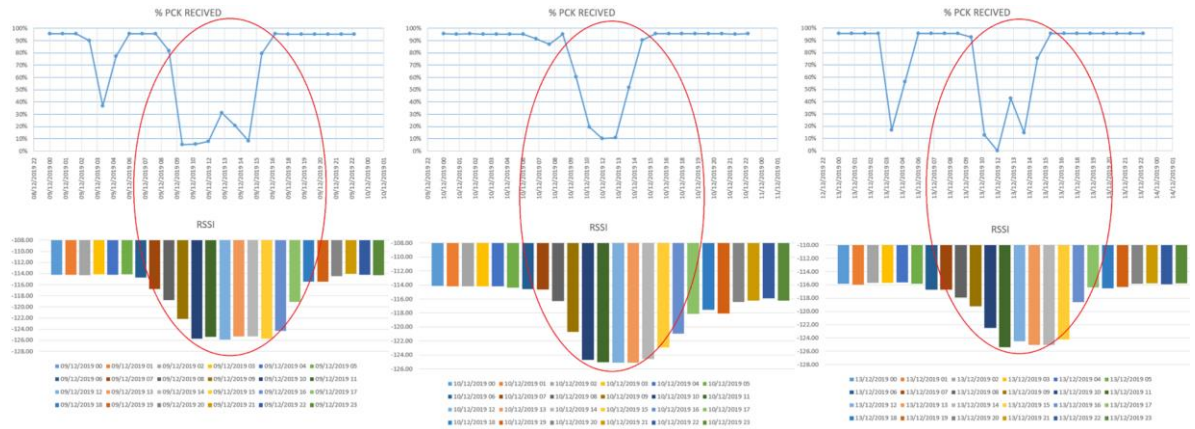
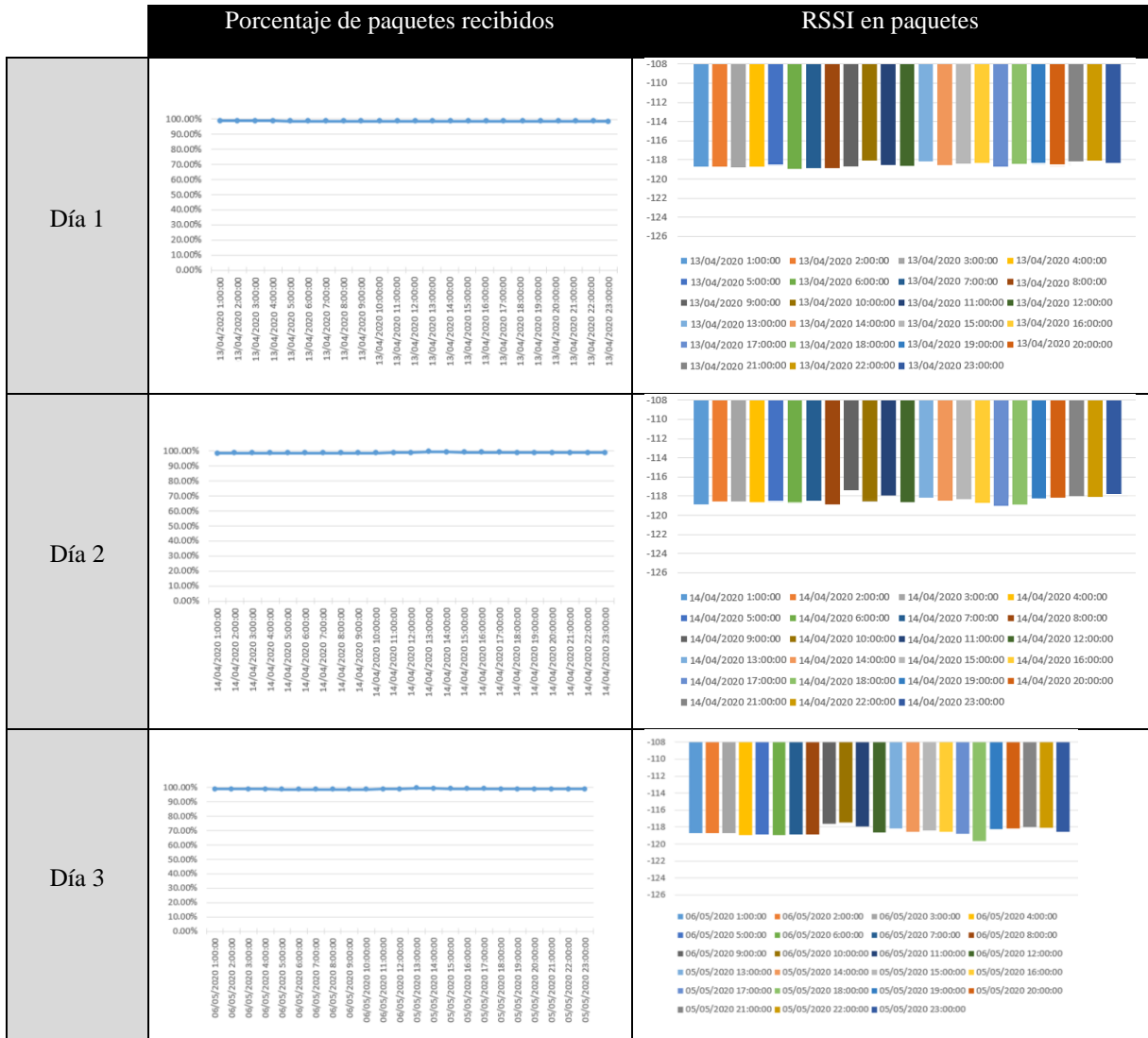


Figura 6.3. Comportamiento de empeoramiento de RSSI detectado y disminución de paquetes recibidos.

Esto coincide con las horas de mayor afluencia de alumnos en el Instituto Tecnológico de la Laguna, esta afluencia de equipos móviles posiblemente puede presentar que señales de radio interfieran con la comunicación de la red, debido a que los dispositivos móviles trabajan en frecuencias muy cercanas a las de 915 MHz. El comportamiento fue generalizado para los 10 días, donde también se puede observar que la pérdida de paquetes no se fue a 0% en casi ningún día, por lo que no se puede adjudicar este comportamiento a la pérdida de comunicación, sino a una posible interferencia o ruido durante esas horas que pudiera bajar el rendimiento de la red en términos de eficiencia.

Durante el confinamiento por causas del covid19 se hicieron pruebas durante tres días, dos consecutivos y una prueba casi un mes después con el fin de observar el comportamiento de porcentaje de paquetes recibidos y niveles de RSSI detectado con la misma configuración RF, en la tabla VI.4, se muestran los gráficos. Se usó el nodo Tx2 Niños Héroeos.

Tabla VI.4. Porcentaje de paquetes recibidos y RSSI detectado en paquetes recibidos del NodoTx2, durante el confinamiento por Covid19.



Se puede observar que el porcentaje de paquetes recibidos fue muy alto y con poca variación en los niveles de RSSI.

Debido a este comportamiento se realizaron pruebas para medir el ruido de fondo en el entorno en diferentes canales de radiofrecuencia.

6.3 Medición de ruido de fondo con SmartRF studio 7

SmartRF studio, como se ha mencionado en capítulos anteriores, es una herramienta que permite evaluar dispositivos RF de Texas Instruments de baja potencia, utilizado para probar el rendimiento de enlaces de radio y afinar configuraciones específicas del hardware [58]. Con SmartRF se puede medir el ruido de fondo desde su interfaz en el apartado Continuous Rx, como se muestra en la figura 6.4.



Figura 6.4. Interfaz Continuous Rx.

El procedimiento para medir el ruido de fondo consiste en [59]:

- 1.- Conectar la tarjeta (Solo la tarjeta Rx, sin fuentes de Tx conocidas).
- 2.- Abrir SmartRF studio.
- 3.- Abrir la pestaña Continuous Rx.
- 4.- Iniciar análisis con Start.
- 5.- El valor que se obtiene en RSSI es el ruido de fondo.

6.3.1 Generación de reportes para medición de ruido

Debido a que SmartRF está diseñado solo para evaluaciones rápidas de comunicación RF, este no cuenta con una opción que permite obtener el valor de RSSI medido y exportarlo a una aplicación externa para su análisis. Debido a esto, se desarrolló una aplicación externa en LabVIEW, con el propósito de generar los reportes. En la figura 6.5, se muestra un diagrama simplificado de los programas usados para la obtención del ruido de fondo, el proceso y generación de reportes.

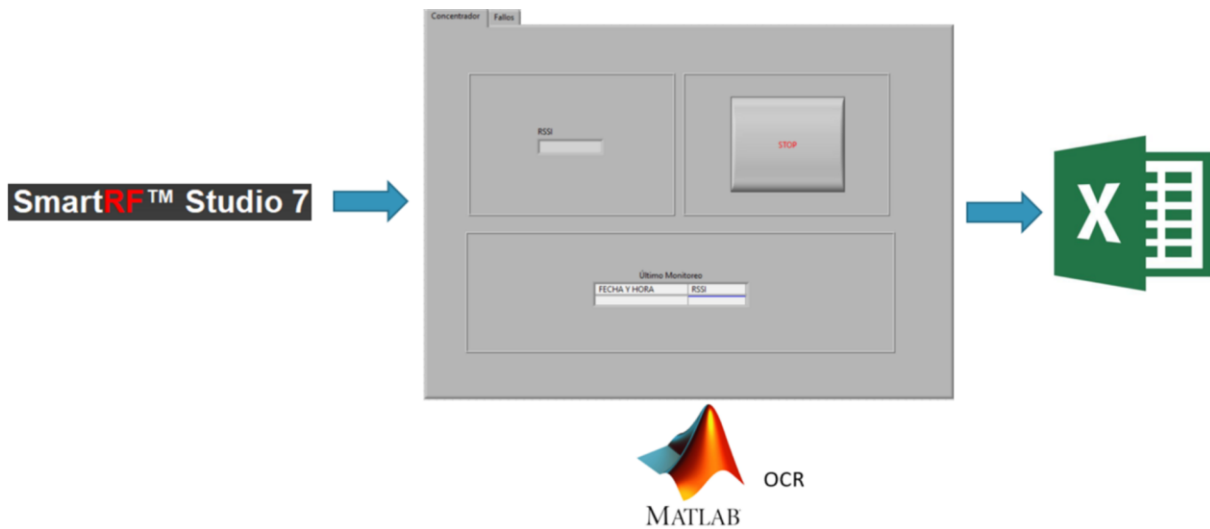


Figura 6.5. Proceso de generación de reportes.

LabVIEW cuenta con un complemento llamado LabVIEW MathScript RT module, el cual se usó para ejecutar un algoritmo de reconocimiento óptico de caracteres (OCR) desde un script de Matlab. El complemento MathScript RT module añade la compatibilidad para el uso de lenguaje textual en el entorno gráfico de LabVIEW, el módulo agrega un compilador original para los archivos .m, propios de Matlab, con lo que es posible combinar un enfoque textual y gráfico para desarrollar algoritmos [60]. En la figura 6.6, se muestra el nodo Matlab script, el cual permite realizar una interfaz directa con Matlab.

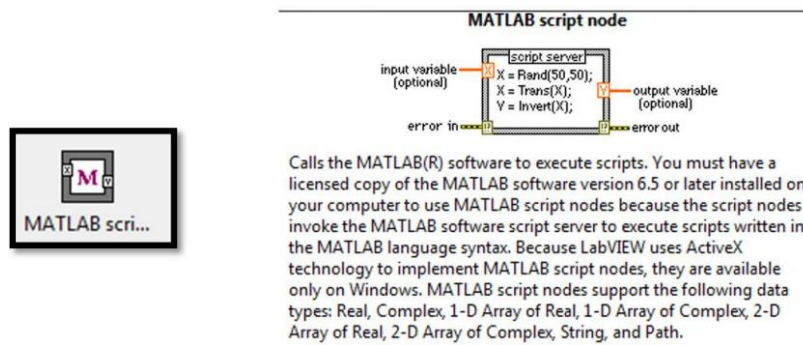


Figura 6.6. Matlab Script Node [61].

El reconocimiento óptico de caracteres (OCR, por sus siglas en ingles), también conocido como reconocimiento de caracteres, es un proceso para la digitalización de textos, que se identifican automáticamente a partir de una imagen, para luego almacenarlos en forma de datos. Con esto se captura el valor del RSSI a través de una sección de la pantalla de Continuous Rx de smartRF.

El proceso es simple, el algoritmo de Matlab captura una porción de la pantalla de Windows, hace un re escalado de la imagen, aplica el reconocimiento óptico de caracteres, genera el resultado en texto y filtra solo los caracteres del valor de RSSI de la ventana continuous Rx. En la figura 6.7, se muestra la sección capturada, el re escalado al cual se le aplica el OCR y el valor de RSSI en texto.

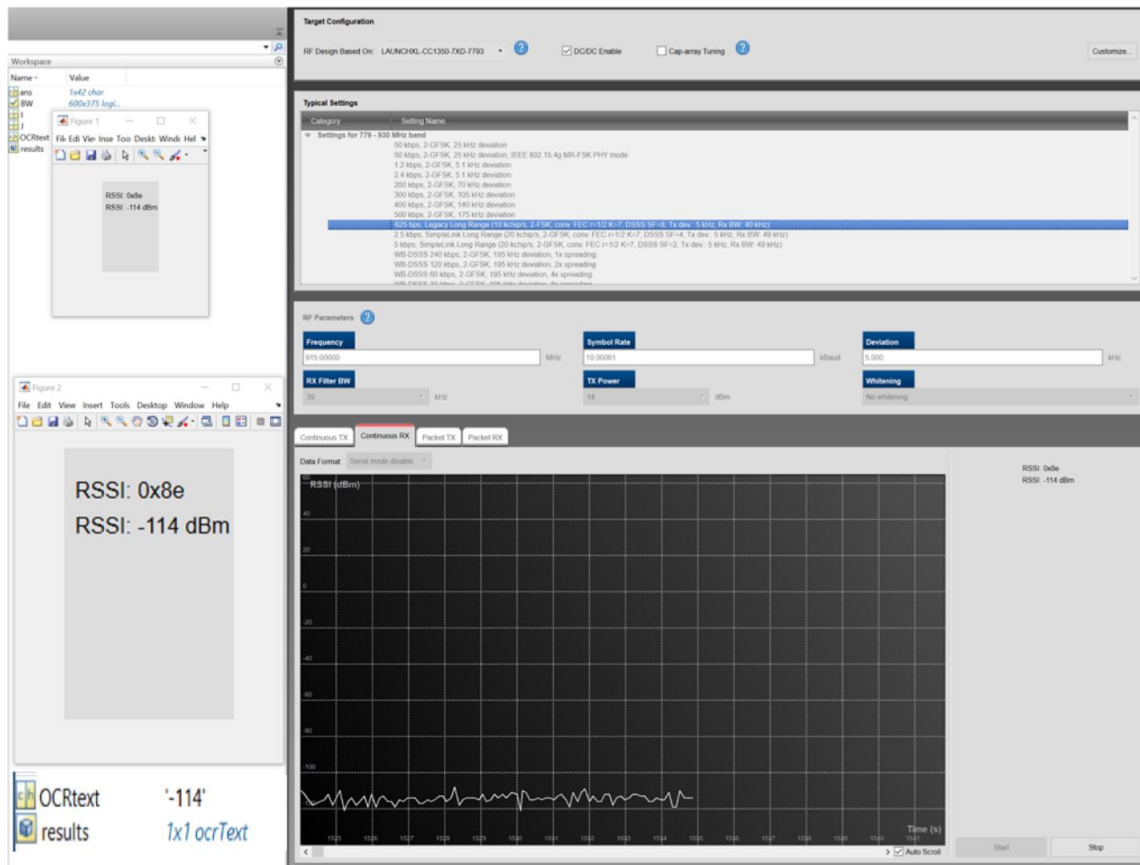


Figura 6.7. Obtención del valor de RSSI con en Matlab.

A los valores de RSSI se les asigna la fecha y hora que se capturó en la aplicación (cada segundo) y se genera una tabla de Excel con esas dos columnas.

Se hicieron mediciones de ruido en 8 diferentes canales de radiofrecuencia, durante el confinamiento por causa del covid19, todos dentro de las bandas de uso libre y en desuso, estos fueron canales entre los 900 MHz y 915 MHz. Durante un día completo se configuraba el nodo concentrador (ubicado en el mismo lugar que se muestra en la figura 6.1.) para medir el ruido de fondo de un canal de frecuencia.

En la figura 6.8, se muestran los promedios de ruido en cada canal medido de todo un día completo.

Mediciones de ruido de fondo

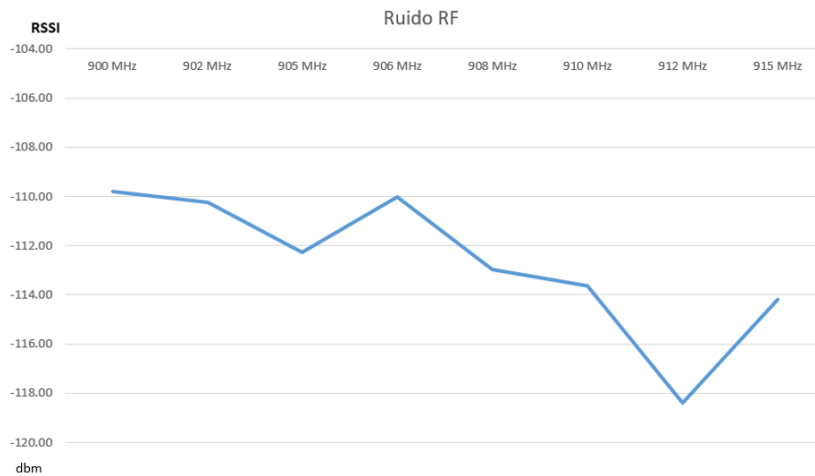


Figura 6.8. Promedio de ruido de fondo en 8 canales.

El ruido de fondo se midió entre abril y mayo del año 2020 para estos 8 canales. En la gráfica de la figura 6.8, se puede observar que hay canales con mayor cantidad de ruido, en especial en las frecuencias más altas. Se dividió en dos bloques los canales de radiofrecuencia, un bloque con mayor ruido y otro bloque con menor ruido detectado en las mediciones de ruido de fondo, esto se muestra en la figura 6.9

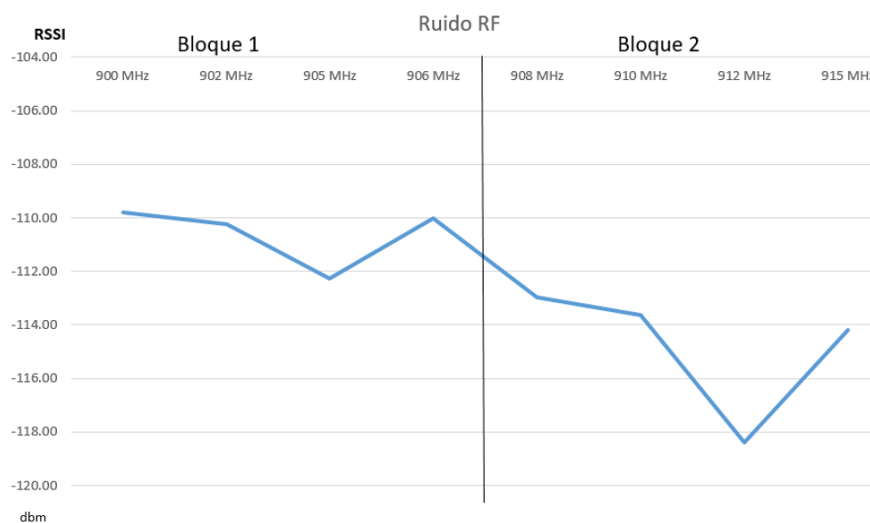


Figura 6.9. División de canales, Bloque 1: Ruido Bajo, Bloque 2: Ruido Alto.

6.4 Salto de frecuencia entre canales

Con el fin de observar el impacto de ruido de fondo en la eficiencia de una red, se desplegaron dos nodos a 100 m de distancia con el algoritmo de modulación de espectro ensanchado por salto de frecuencia desarrollado y descrito en [62], para realizar pruebas.

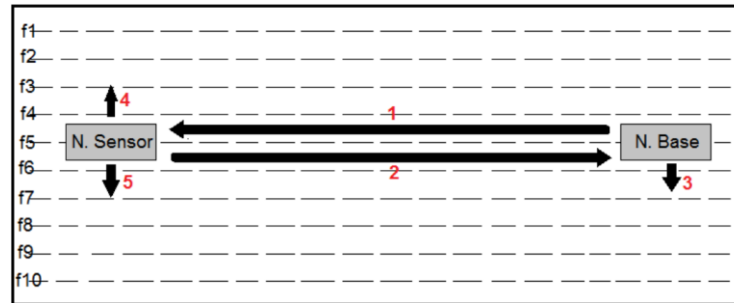


Figura 6.10. Algoritmo de comunicación de salto de frecuencia [62].

El diagrama del algoritmo mencionado se muestra en la figura 6.10, el cual se utilizó para cumplir con la sincronización, transmisión y recepción de datos para dos nodos. Se representan 10 saltos de f1 hasta f10, donde ambos nodos deben conocer la secuencia de salto. El algoritmo inicia con la sincronización de los nodos, donde el nodo base cambia de frecuencia en el sentido de la flecha 3, el nodo sensor se mueve en el sentido de la flecha 4, con el fin de coincidir más rápido debido al sentido opuesto del salto. El nodo base transmite una señal en cada canal para comenzar la comunicación con el nodo sensor (flecha 1) y espera un tiempo por la respuesta del nodo sensor (flecha 2). Si no se recibe la respuesta cambia de frecuencia (flecha 3). El nodo sensor espera un tiempo y si no recibe la primera señal (flecha 1) cambia de frecuencia en un orden descendente (flecha 4), sin embargo si recibiera la señal el cambio sería en el otro sentido (flecha 5). Entonces al recibir la señal se pondría en sincronía con el nodo base ya que ambos estarían cambiando en el mismo sentido. La flecha 1 representa la señal de permiso, para que el nodo sensor responda con la transmisión de un paquete de información (flecha 2), con esto el nodo sensor no enviará información hasta que el nodo base se lo solicite y de esa manera evitar pérdida de información enviada desde el sensor.

La cantidad de saltos para las pruebas realizadas se dieron en 4 canales por bloque (figura 6.8), lo que facilita la sincronización de los nodos. Se debe tener en cuenta que para desplegar una red inalámbrica fija que funcionara por un largo periodo de tiempo bajo el algoritmo de modulación de espectro ensanchado por salto de frecuencia, se deben cumplir la Norma Oficial Mexicana NOM-121-SCT1-2009 [63], donde se especifica la potencia máxima permitida, el número de saltos, el tiempo de ocupación del canal y el espacio entre canales. En este caso al ser pruebas de baja duración con el fin de conocer el posible impacto del nivel de ruido de fondo detectado en una red de dos nodos, el número de saltos y la separación de canales se limitaron a los canales donde se midió el nivel de ruido de fondo que se muestran en la figura 6.8.

6.5 Resultados de impacto de ruido de fondo en recepción de paquetes

Las pruebas se realizaron durante 1 día completo para cada bloque o canal analizado. En la figura 6.11, se muestran los resultados, en porcentaje de paquetes recibidos en ambos bloques, así como los canales (sin salto de frecuencia) de 912 y 902 MHz.



Figura 6.11. Porcentaje de paquetes recibidos por hora, Bloque 1, Bloque 2, 902 MHz, 912 MHz.

El porcentaje de paquetes recibidos en la frecuencia de 912 MHz se analizó debido a que se detectó el mayor ruido de fondo durante las mediciones en esa frecuencia, mientras que el canal 902 MHz fue la frecuencia con menor ruido detectado, ambas frecuencias dentro de las bandas ICM de uso libre en México.

En las gráficas se puede observar claramente como el bloque 1, conformado por las 4 frecuencias con menor ruido de fondo hubo una mejor recepción de paquetes que en el bloque 2 conformado por las 4 frecuencias con mayor ruido de fondo detectado. Igualmente, y sin usar el algoritmo de salto de frecuencia. Los paquetes recibidos en la frecuencia 902 MHz con menor ruido de fondo tuvo una eficiencia mucho mayor durante las pruebas. Mientras que, la frecuencia de 912 MHz, hubo un declive en el porcentaje de paquetes recibidos al ser la frecuencia con mayor cantidad de ruido detectado.

En la tabla VI.5, se muestran los promedios generales tanto del porcentaje de error y de paquetes recibidos de las 4 pruebas realizadas.

Tabla VI.5. Promedio general de porcentaje de paquetes recibidos y error.

Prueba	Frecuencias (MHz)	Error (%)	Paquetes recibidos (%)
1 Canal	912	38.67%	61.33%
1 Canal	902	0.88%	99.02%
4 canales (Bloque 1)	900, 902, 905, 906	0.87%	99.13%
4 canales (Bloque 2)	908, 910, 912 915	11.53%	88.47%

En la tabla VI.5, y en la figura 6.12 se aprecia el mejor desempeño de las comunicaciones de la red en las frecuencias donde se detectó menos ruido de fondo, tanto usando el algoritmo de salto de frecuencia como en pruebas en un solo canal.

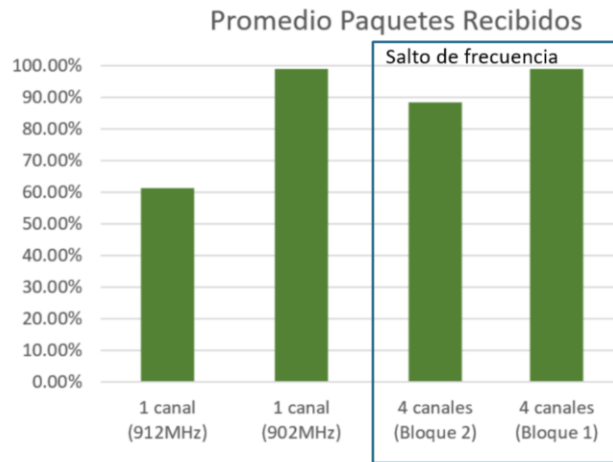


Figura 6.12. Promedio general de porcentaje de paquetes recibidos para el Bloque 1, Bloque 2, 902 MHz y 912 MHz.

En la figura 6.13, se puede observar mejor el comportamiento de los paquetes de los dos bloques por salto de frecuencia, en este caso con los paquetes perdidos en cada canal. Se aprecia la mayor cantidad de paquetes perdidos en canales del bloque 2, donde en la frecuencia de 912 MHz fue la más afectada por el ruido de fondo o interferencia en ese canal, cerca del 56% del total de paquetes perdidos en la prueba del bloque 2, se perdieron en esta frecuencia. También se puede observar que en las frecuencias del bloque 1, hubo menos paquetes perdidos, en donde las frecuencias de 900 MHz (banda en desuso) y 902 MHz (banda ICM) tuvieron el mejor comportamiento.

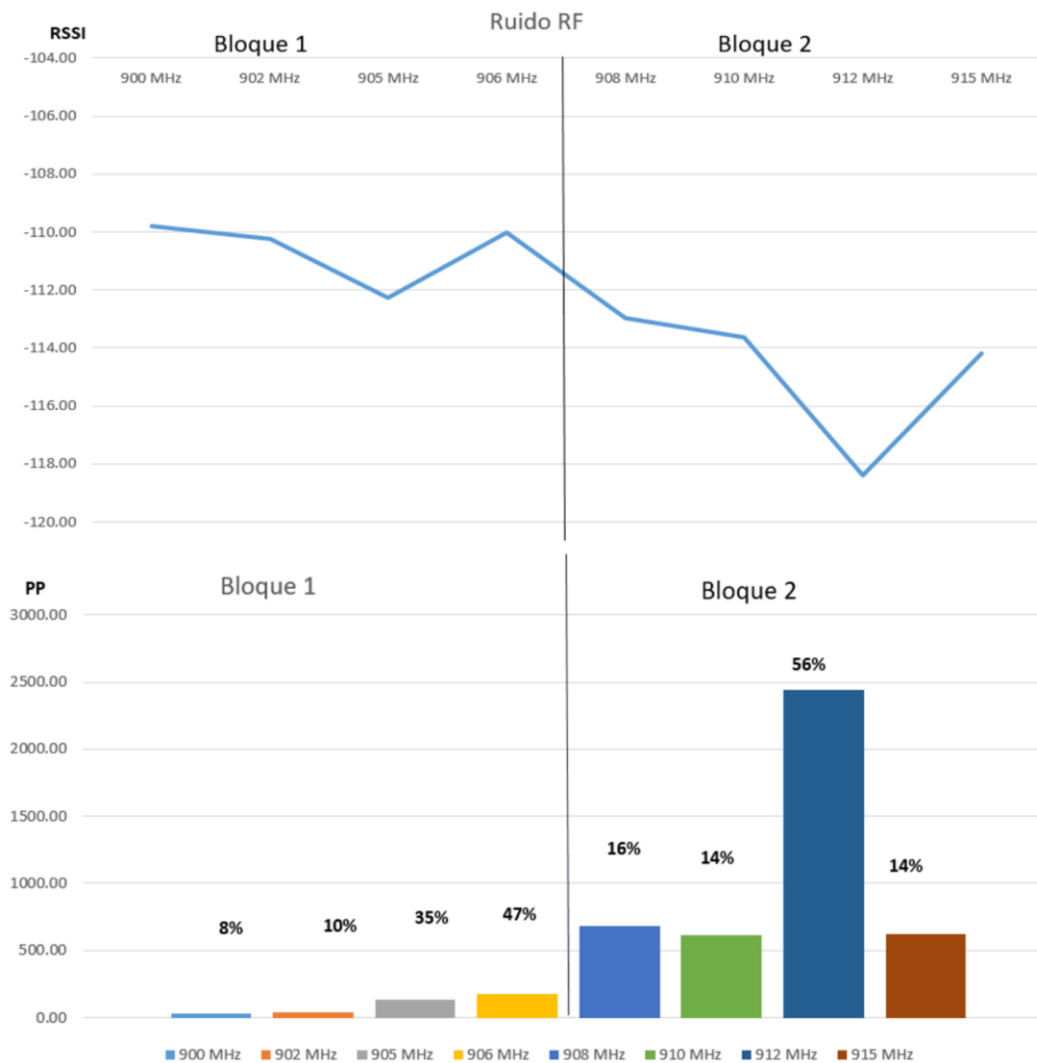


Figura 6.13. Numero de paquetes perdidos y porcentaje de paquetes perdidos por canal para el bloque 1 y bloque 2.

Es complicado conocer las fuentes de ruido de fondo en un ambiente urbano debido a la gran cantidad de fuentes de donde pueden provenir y que este sea el único motivo en la pérdida de paquetes en una comunicación inalámbrica. Sin embargo, con estas pruebas se pudo detectar el efecto que puede llegar a tener en la eficiencia de una red, y que debe tomarse en cuenta en el despliegue de futuras redes inalámbricas.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

En este capítulo se presentan las conclusiones de los objetivos planteados en el trabajo, así como trabajos a futuro y puntos de mejora.

7.1 Conclusiones

- El objetivo principal del trabajo de tesis fue el de obtener una herramienta de simulación para RIS confiable, con representación geográfica 3D de la región. Esto se logró con el desarrollo de lo que denominamos como cama de simulación 3D, siendo este el principal aporte del trabajo. Funciona como una herramienta analítica de simulación para el diseño de cualquier tipo de red, alámbrica o inalámbrica, con características propias del entorno urbano de la región.
- Para su desarrollo se usaron aplicaciones de código abierto como lo son OSG, OsgEarth y OpenStreetMap, que se integran al ecosistema de OMNeT++. El simulador permite adentrarse en el uso de una gran cantidad de herramientas de simulación proporcionados por el ecosistema OMNeT++. La cama de simulación 3D se beneficia de una estructura altamente modular, con una interfaz gráfica de usuario amigable y bien documentado gracias a OMNeT++ e INET framework. Permite hacer implementaciones en cualquier capa del modelo OSI (capa física, de enlace, red, transporte, aplicación), implementación de protocolos de enrutamiento, modelos de propagación de señal, coberturas de radio, modelado de consumo energético, el uso de diversos protocolos MAC, movilidad de nodos, animaciones y tipos de visualización, son algunas de las capacidades con las que cuenta la cama de simulación 3D y que permite escalar en complejidad, adentrándose en aspectos más a detalle en el simulado de redes si es requerido, dependiendo de la aplicación o caso de estudio a realizar. OMNeT++ permite simulaciones de redes

inalámbricas de gran escala, de entre 400 hasta 2000 nodos, con costos computacionales aceptables, comparado con otros simuladores. Por otra parte, el reciente lanzamiento de Simu5G amplía el panorama de posibilidades en la simulación de tecnologías novedosas referentes al 5G, donde su principal valor práctico radica en su capacidad de integrar en simulaciones cualquier modelo y librería para OMNeT++, y haciendo extensivos el uso de modelos desde INET Framework como enrutadores y nodos. Esto permite adentrarse a simulaciones bajo diferentes contextos, donde se busque la interconectividad inteligente y permanente entre dispositivos en la ciudad. El uso del mapeado de la cama de simulación 3D con simu5G, el uso de los modelos de movilidad de INET framework e interfaces externas con aplicaciones como Phytion, permite simular nuevos servicios de tecnologías de información y comunicación, como ciudades inteligentes, vehículos autónomos, realidad aumentada e industria 4.0.

- Se logró cubrir una sección de la ciudad con modelos 3D de edificaciones, objetos físicos y vegetación que comprenden un área de 1 km² que se toman en cuenta durante simulaciones, para redes pequeñas y medianas, así como el mapa completo de las ciudades de Torreón, Gómez Palacio y Lerdo con vías y distancias reales, además de los datos de elevación de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM, por sus siglas en inglés), que comprenden un área de 111.12 km x 111.32 km, para redes de gran escala. En la literatura no se encontraron esfuerzos parecidos del desarrollo de un entorno 3D con datos de elevación que represente una región de México en un simulador accesible y establecido como lo es OMNeT++. Las representaciones virtuales de ciudades en otros simuladores tienen un enfoque muy específico en simulación de tráfico y redes vehiculares.
- Durante el presente trabajo se han usado dos prototipos de nodos sensores a lo largo del tiempo con los mismos componentes electrónicos. Las diferencias radican a nivel estructural y capacidad de alojamiento de dispositivos en sus interiores, donde debido al alcance futuro del proyecto se deben considerar diversas alternativas para su uso prolongado en exteriores. Durante las pruebas que se han realizado, ambos diseños han soportado altas y bajas temperaturas a sol directo, sin ningún tipo de desgaste, además

de ninguna fuga de agua que inhabilite o dañe los componentes electrónicos. Esto los hace aptos para ser desplegados en zonas urbanas.

- La tarjeta CC1350 LaunchPad resulta ideal para trabajar en frecuencias sub-1 GHz, dentro de bandas de uso libre y en desuso en México (900 MHz – 928 MHz). Resultando de gran ayuda la herramienta de depuración para sistemas de radiofrecuencia SmartRF studio, permitiendo modificar los parámetros de comunicación que utiliza el API EasyLink, que posibilita el uso de Energía IDE para la programación de las tarjetas. SmartRF permitió implementar dos configuraciones en los prototipos de nodos, el TI Legacy Long Range Mode (LRM) y el estándar IEEE 802.15.4. Ambas configuraciones se implementaron y simularon en la cama de simulación 3D.
- Se programó una aplicación en LabVIEW con el fin de crear un formato de captura de datos en Excel, que facilitó la generación de reportes para las diferentes pruebas.
- Se logró incrementar el alcance de comunicación de las tarjetas al usar una antena externa tipo whippe “IP-65 Outdoor 868 & 915 MHz”, obteniendo una distancia máxima aceptable con la configuración de largo alcance de TI LRM de hasta 200 m, en un lugar abierto sin objetos físicos que interfieran, y comunicaciones casi perfectas a distancias menores de 135 m. Esto teniendo en cuenta una fuente estable de alimentación. Para el estándar IEEE 802.15.4 se tienen comunicaciones confiables a distancias menores a 50 m y con dificultades a una distancia máxima de 100 m. Para los rangos de comunicación aceptable el TI LRM a 200 m hubo una diferencia con las simulaciones del 6% de paquetes recibidos, mientras que para el estándar IEEE 802.15.4 a 50 m hubo una diferencia de 7.1%.
- Cuando se realiza cualquier tipo de simulación, siempre existe una preocupación primordial en que los resultados puedan no reflejar un comportamiento preciso, bajo esta premisa se presentaron dos casos comparativos, permitiendo obtener conclusiones alentadoras. Sobre la eficiencia de las redes expresada en paquetes recibidos hubo una coincidencia promedio entre datos recolectados por la red desplegada y simulados del 92% para el estándar IEEE 802.15.4 y un 95% para TI LRM, además de un comportamiento esperado para los niveles de RSSI al variar la distancia entre nodos. Tanto las pruebas como las simulaciones para ambos casos comparativos, nos permiten

observar que la eficiencia de la red decae conforme se incrementa la distancia, al igual que el nivel de RSSI promedio detectado es más débil conforme la distancia es mayor. Que haya un comportamiento con alta similitud entre los datos obtenidos de las RIS y los simulados nos dan certeza sobre el uso futuro de la cama de simulación 3D para el diseño de redes más complejas.

- Se lograron realizar simulaciones en la cama de simulación 3D enfocando esfuerzos en representar lo más fiel posible los parámetros de radiofrecuencia de los nodos, con ubicaciones exactas en tres ejes, y tomando en cuenta factores que pueden afectar el alcance de la señal y a la calidad de la comunicación, como lo son el tipo y características de las antenas utilizadas, el ruido ambiental, atenuación de la señal y objetos físicos del ambiente urbano. Si bien las pruebas fueron simples, y con pocos nodos, INET framework y la cama de simulación 3D permiten, como ya se ha mencionado, escalar en complejidad y adentrarse en aspectos más a detalle dependiendo del estudio a realizar. Los resultados invitan a tener confianza en el uso de la cama de simulación 3D para futuras simulaciones, sin embargo, se debe tener en cuenta las limitantes de su estado actual.
- Se observó durante el funcionamiento de una red inalámbrica de sensores conformada por 3 nodos para la medición de CO₂ en el Instituto Tecnológico de la Laguna el comportamiento del tráfico de paquetes durante cada hora a lo largo de 10 días, se notó que a determinadas horas del día la eficiencia de la red expresada en paquetes recibidos empeoraba, a la vez que el nivel de RSSI lo hacía de igual manera. Debido a esto, se realizaron mediciones de ruido de fondo, con el fin de observar el impacto de estas o posibles interferencias en las comunicaciones inalámbricas desplegadas en el instituto. Se programó una aplicación en LabVIEW con una interfaz a Matlab para poder obtener el valor de RSSI correspondiente al ruido de fondo medido por SmartRF studio, gracias a un OCR. La aplicación LabVIEW también se encargó de generar los reportes asignando fecha y hora a la información para su análisis.
- Se midió el ruido de fondo en 8 canales de radiofrecuencia entre los 900 MHz y 915 MHz, se clasificaron en dos bloques de 4 canales, un bloque con el menor ruido de fondo y otro con el mayor ruido de fondo.

- Se instaló una red inalámbrica de sensores punto a punto, usando el algoritmo de salto de frecuencia para estos dos bloques. Se observó que sí hubo una diferencia en el rendimiento. Hubo mayor porcentaje de paquetes recibidos en el bloque con menos ruido de fondo detectado. También se pudo observar que usando solo el canal con mayor ruido de fondo (912 MHz), la recepción de paquetes fue peor en un 37.69% comparado con el canal con menor ruido (902 MHz) dentro de las bandas de uso libre ICM. Con esto, se detectó el efecto que puede llegar a tener el ruido de fondo en un entorno en la eficiencia de una red, y que debe tomarse en cuenta en el despliegue de futuras redes inalámbricas.

7.2 Trabajos a futuro

El trabajo presentado busca sentar las bases para el desarrollo de un proyecto extensivo en el desarrollo de redes inalámbricas de sensores en la región, desde el diseño de redes inalámbricas con la cama de simulación 3D, hasta conocer el comportamiento, alcance y limitantes en los primeros pasos en el despliegue de redes inalámbricas con los prototipos de nodos sensores. Se espera que este trabajo aporte valor y certidumbre a los esfuerzos de generar sistemas en base a redes inalámbricas de sensores que permitan de la forma eficaz y viable el monitoreo ambiental en la ciudad de Torreón y la Comarca Lagunera. El conjunto de pruebas y simulaciones ayudarán a entender de mejor forma ciertos fenómenos que pueden intervenir en el éxito del uso de esta tecnología.

Sin embargo, se deben considerar las limitaciones de la cama de simulación 3D, así como las limitantes de los prototipos de nodo sensores.

A continuación, se presenta un listado de mejoras, consideraciones y posibles trabajos a futuro en cuanto a la cama de simulación:

- Aumentar la cantidad de objetos físicos que se toman en cuenta durante la simulación, así como los modelos 3D de las edificaciones. Con el fin de obtener un área mayor para el simulado de redes de mayor escala.
- Los datos de elevación de la cama de simulación 3D son una representación de la topografía de la región, que no tiene efectos en simulación.

- Integrar al completo Simu5G 1.2.1 a la cama de simulación para OMNeT++ v6.0 e INET framework v4.4.0.
- Analizar de forma más exhaustiva el impacto de los objetos físicos en la comunicación inalámbrica, así como el ruido de fondo y temperatura ambiental en las simulaciones.

A continuación, se presenta un listado de mejoras, consideraciones y posibles trabajos a futuro en cuanto a los nodos sensores y despliegue de RIS:

- Escalar en cantidad de nodos que conforman una red, y observar tanto en simulación y con despliegue de nodos, el comportamiento y el posible colapso de paquetes.
- Al escalar en cantidad de nodos se espera implementar un protocolo de enrutamiento adecuado que permita el correcto funcionamiento de la red.
- La medición de ruido de fondo presentado en este trabajo podría ayudar al tomarse en cuenta como retroalimentación en tiempo real en un protocolo de enrutamiento que tome en cuenta los canales con menos ruido detectado en el entorno para el enrutamiento de la información.
- El alcance máximo de rango para los nodos podría mejorarse si se usa una antena externa con mayor ganancia que la presentada en estos prototipos
- Así mismo se puede incrementar la potencia máxima de transmisión de 12 dBm a 14 dBm. Las tarjetas son capaces de llegar a transmitir a 14 dBm pero Texas Instruments lo limita, aún y cuando se especifica en Energía IDE (necesario buscar en los archivos fuente la instrucción que limita la potencia de transmisión), y observar las consecuencias en el consumo energético o calentamiento de la tarjeta.

Los aspectos mencionados anteriormente solo son algunos tópicos que quedan abiertos como oportunidades de mejora para trabajos futuros que busquen implementar características adicionales de lo mostrado.

ANEXO A

Código del archivo torreon.earth para cama de simulación 3D

```
<!--OpenStreetMap's Mapnik "Slippy Map" - Geocentric.
See: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Slippy\_map\_tilenames-->

<map name="OpenStreetMap" type="geocentric" version="2">
  <image name="osm_mapnik" driver="xyz">
<url>http://[abc].tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png</url>
  <profile>spherical-mercator</profile>
  <cache_policy usage="none"/>
  <attribution>#169;OpenStreetMap contributors</attribution>
</image>

  <options>
    <lighting>>false</lighting>
    <terrain>
      <min_tile_range_factor>8</min_tile_range_factor>
    </terrain>
  </options>

  <model name="buildings" driver="feature_geom">
    <features name="buildings" driver="ogr">
      <url>data/Torreon5-polygon.shp</url>
      <build_spatial_index>>true</build_spatial_index>
    </features>

    <layout tile_size_factor="52">
      <level name="default" max_range="20000" style="buildings"/>
    </layout>

    <styles>
      <library name="us_resources">
        <url>data/resources/textures_us/catalog.xml</url>
      </library>

      <style type="text/css">
        buildings {
          extrusion-height:          3.5 * max([building_1], 1);;
          extrusion-flatten:         true;
          extrusion-wall-style:      building-wall;
          extrusion-wall-gradient:   0.8;
          extrusion-roof-style:      building-rooftop;
          altitude-clamping:         terrain;
          altitude-technique:        map;
          altitude-binding:          vertex;
        }
      </style>
    </styles>
  </model>
</map>
```

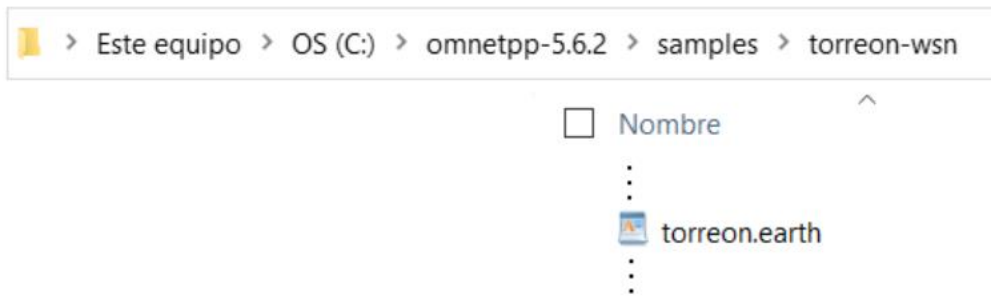
```
        building-wall {
        skin-library:    us_resources;
        skin-tags:      building;
        skin-random-seed: 1;
        fill:           #ffffff;
        }
        building-rooftop {
        skin-library:    us_resources;
        skin-tags:      rooftop;
        skin-tiled:     true;
        skin-random-seed: 1;
        fill:           #ffffff;
        }
    </style>
</styles>
</model>

<external>
    <viewpoints>
        <viewpoint name="Tecnologico de la Laguna" heading="-25"
height="50" lat="25.53497" long="-103.43540" pitch="-90"
range="480"/>
        <viewpoint name="Bosque Venustiano Carranza" heading="24"
height="50" lat="25.541" long="-103.432" pitch="-20" range="1000"/>
        <!--<viewpoint name="Overview" heading="24.261" height="0"
lat="42.34425" long="-71.076262" pitch="-21.6" range="3450"/>
        <viewpoint name="Downtown 1" heading="117" lat="42.3568"
long="-71.0585" height="0" pitch="-20.4" range="1500" />
        <viewpoint name="Downtown 2" heading="-128.5" lat="42.3582"
long="-71.0546" height="0" pitch="-19" range="1620" />
        <viewpoint name="Street Level" heading="-193" lat="42.3569"
long="-71.07" pitch="0" height="20" range="85"/> -->
    </viewpoints>
    <sky hours="14.0"/>
</external>

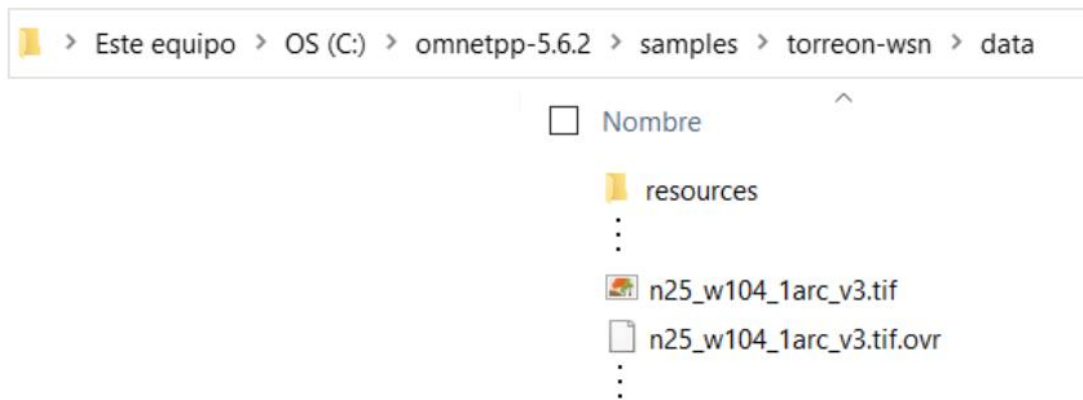
<!--Add a base map of the blue marble data-->
<!--<image name="blumarble" driver="gdal">
<url>c:/data/blumarble.tif</url>
</image> -->
<!--Add SRTM data-->

<!-- <elevation name="srtm" driver="gdal">
    <min_level>7</min_level>
    <max_level>17</max_level>
    <url>data/n25_w104_larc_v3.tif</url>
</elevation> -->
</map>
```

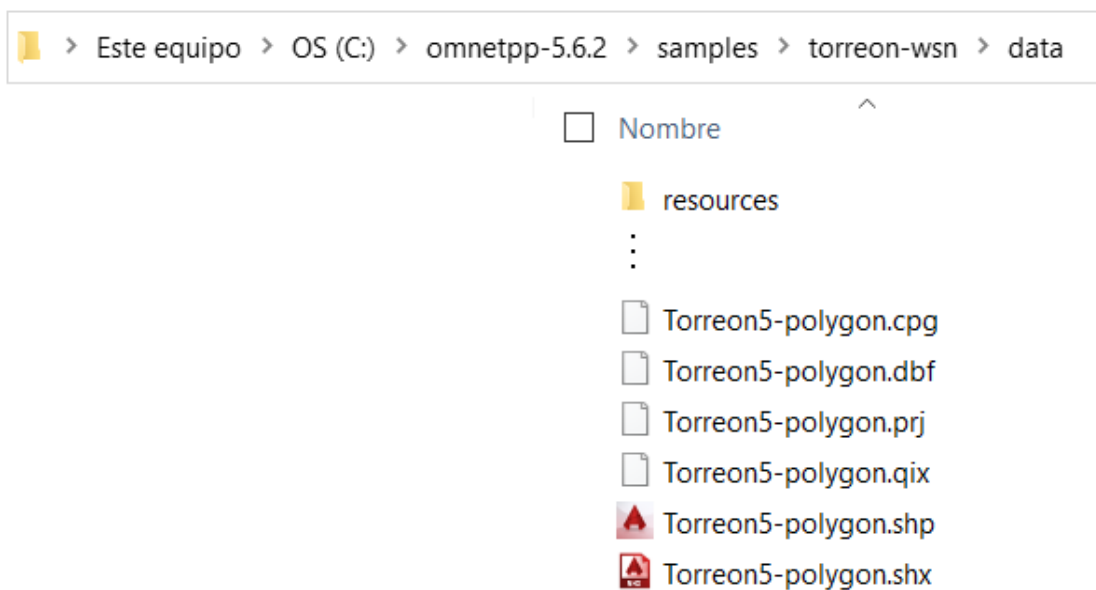
Archivo *torreon.earth* para cama de simulación 3D.



Archivo datos de elevación *n25_w104_1arc_v3.tif*



Archivo *Torreon5-polygon.shp* para cama de simulación 3D usado por archivo .earth.



Formas del archivo *Torreon5-polygon.shp* para cama de simulación 3D usado por archivo *.earth*.



Código de obstáculos físicos durante simulación *ObstacleTorreon.xml* usado por INET Framework.

```
<environment>
<!-- <object position="min 25.53575 -103.43531 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 10 25.53617 -103.43435 25.53617 -103.43531
25.53575 -103.43531 25.53575 -103.43435" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
Cuahutemoc, lopez ortiz, Carranza, revolucion -->
<object position="min 25.53286 -103.43693 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 10 25.53298 -103.43693 25.53286 -103.43693
25.53286 -103.43668 25.53299 -103.43668" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
```

Anexos

```
<object position="min 25.53306 -103.43682 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6.2 25.53306 -103.43683 25.53328 -103.43683 25.53329 -103.43660 25.53307 -103.43660" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53296 -103.43652 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 10 25.53295 -103.43652 25.53311 -103.43652 25.53311 -103.43626 25.53295 -103.43626" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53266 -103.43694 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 5 25.53266 -103.43694 25.53280 -103.43694 25.53280 -103.43675 25.53266 -103.43675" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53266 -103.43665 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6.26 25.53266 -103.43665 25.53280 -103.43665 25.53280 -103.43623 25.53266 -103.43623" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53252 -103.43639 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6.94 25.53252 -103.43639 25.53263 -103.43639 25.53263 -103.43621 25.53252 -103.43621" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53252 -103.43610 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7.08 25.53252 -103.43610 25.53276 -103.43610 25.53276 -103.43581 25.53252 -103.43581" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53319 -103.43644 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 4.5 25.53319 -103.43644 25.53319 -103.43644 25.53319 -103.43618 25.53319 -103.43618" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53352 -103.43655 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53352 -103.43655 25.53352 -103.43655 25.53353 -103.43630 25.53352 -103.43630" material="forest" resistivity="0" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53307 -103.43604 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 8.03 25.53307 -103.43604 25.53307 -103.43604 25.53306 -103.43579 25.53307 -103.43579" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53293 -103.43579 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 4 25.53293 -103.43579 25.53293 -103.43579 25.53293 -103.43566 25.53293 -103.43566" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53355 -103.43607 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 5 25.53355 -103.43607 25.53355 -103.43607 25.53355 -103.43591 25.53355 -103.43591" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53403 -103.43648 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53403 -103.43648 25.53403 -103.43648 25.53403 -103.43622 25.53403 -103.43622" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53385 -103.43581 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 5 25.53385 -103.43581 25.53385 -103.43581 25.53385 -103.43542 25.53385 -103.43542" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53412 -103.43605 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 5 25.53412 -103.43605 25.53412 -103.43605 25.53413 -103.43566 25.53412 -103.43566" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53438 -103.43639 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53438 -103.43639 25.53438 -103.43639 25.53438 -103.43598 25.53438 -103.43598" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53333 -103.43573 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53333 -103.43573 25.53333 -103.43573 25.53333 -103.43546 25.53333 -103.43546" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53245 -103.43575 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 5 25.53245 -103.43575 25.53245 -103.43575 25.53245 -103.43546 25.53245 -103.43546" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53195 -103.43572 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53195 -103.43572 25.53195 -103.43572 25.53195 -103.43558 25.53195 -103.43558" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53241 -103.43541 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53241 -103.43541 25.53241 -103.43541 25.53241 -103.43483 25.53241 -103.43483" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53175 -103.43561 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53175 -103.43561 25.53175 -103.43561 25.53174 -103.43527 25.53175 -103.43527" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53444 -103.43589 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53444 -103.43589 25.53444 -103.43589 25.53443 -103.43546 25.53444 -103.43546" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
```

<object position="min 25.53466 -103.43616 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53478 -103.43616 25.53466 -103.43616 25.53466 -103.43587 25.53477 -103.43587" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53488 -103.43623 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53499 -103.43623 25.53488 -103.43623 25.53489 -103.43581 25.53499 -103.43581" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53474 -103.43576 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53486 -103.43576 25.53474 -103.43576 25.53473 -103.43545 25.53486 -103.43545" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53345 -103.43530 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53371 -103.43529 25.53345 -103.43530 25.53345 -103.43467 25.53370 -103.43467" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53394 -103.43522 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53406 -103.43522 25.53394 -103.43522 25.53394 -103.43462 25.53406 -103.43462" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53414 -103.43548 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53433 -103.43548 25.53414 -103.43548 25.53413 -103.43525 25.53433 -103.43525" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53440 -103.43532 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53451 -103.43532 25.53440 -103.43532 25.53440 -103.43499 25.53451 -103.43499" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53419 -103.43495 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53431 -103.43495 25.53419 -103.43495 25.53419 -103.43447 25.53431 -103.43447" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53467 -103.43511 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53476 -103.43511 25.53467 -103.43511 25.53467 -103.43472 25.53476 -103.43472" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53488 -103.43534 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53499 -103.43534 25.53488 -103.43534 25.53488 -103.43516 25.53499 -103.43516" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53489 -103.43505 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53534 -103.43505 25.53489 -103.43505 25.53488 -103.43473 25.53534 -103.43473" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53294 -103.43517 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 6 25.53319 -103.43516 25.53294 -103.43517 25.53294 -103.43448 25.53321 -103.43447" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53188 -103.43511 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53230 -103.43511 25.53188 -103.43511 25.53188 -103.43495 25.53230 -103.43496" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.53152 -103.43534 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53165 -103.43535 25.53152 -103.43534 25.53152 -103.43500 25.53166 -103.43501" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Edificio # Tec laguna -->
<object position="min 25.52972 -103.43593 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 7 25.53014 -103.43594 25.52972 -103.43593 25.52972 -103.43556 25.53013 -103.43555" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Gimnasio -->
<object position="min 25.52891 -103.43637 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 8 25.52940 -103.43631 25.52891 -103.43637 25.52890 -103.43586 25.52927 -103.43588" material="brick" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="203 65 84" opacity="0"/>
<!--Biblioteca -->

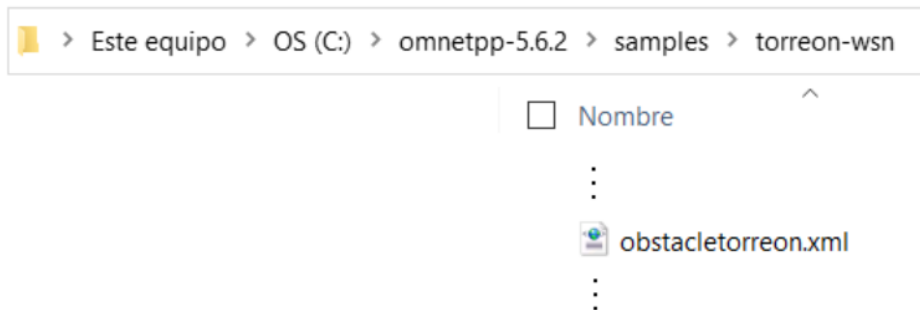
<object position="min 25.53838 -103.43415 0.1" orientation="0 0 0" shape="prism 10 25.54470 -103.43408 25.54470 -103.43131 25.53834 -103.43131 25.53838 -103.43415" material="forest" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.4"/> <!--Bosque-->
<object position="center 25.53309 -103.43655 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Bosque-->
<object position="center 25.53304 -103.43668 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Bosque-->
<object position="center 25.53304 -103.43684 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Bosque-->
<object position="center 25.53269 -103.43616 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Bosque-->
<object position="center 25.53233 -103.43629 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100" relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Bosque-->

```

<object position="center 25.53226 -103.43629 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Bosque-->
<object position="center 25.53187 -103.43685 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 10" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53180 -103.43705 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="concrete" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53169 -103.43712 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="brick" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53148 -103.43717 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="brick" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53124 -103.43715 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53110 -103.43714 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53090 -103.43712 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53180 -103.43646 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53154 -103.43615 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53134 -103.43615 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53209 -103.43534 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 8" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Cancha 1-->
<object position="center 25.53495 -103.43575 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 14" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
<object position="center 25.53531 -103.43563 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 6" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
<object position="center 25.53532 -103.43549 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 6" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
<object position="center 25.53534 -103.43539 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 6" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
<object position="center 25.53484 -103.43617 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 6" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
<object position="center 25.53485 -103.43604 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 6" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
<object position="center 25.53484 -103.43592 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 6" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
<object position="center 25.53456 -103.43605 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 5" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
<object position="center 25.53461 -103.43593 1" orientation="0 0 0" shape="sphere 5" material="forest" resistivity="100"
relativePermittivity="0" fill-color="160 228 160" opacity="0.6"/> <!--Caceta Niños heroes bvr. Revolucion-->
</environment>

```

Archivo *Obstacletorreon.xml*.



ANEXO B**Códigos Energia IDE para mediciones de rango y eficiencia en un solo canal, compatibles con aplicación LabVIEW para almacenar reportes.****Nodo Base:**

```
#include "EasyLink.h
EasyLink_RxPacket rxPacket;
EasyLink myLink;
int C = 0, CE = 0, C1=0,C2=0,CET=0;
double Err;
int S3=0;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // begin defaults to 625bps Long Range Mode
  myLink.begin(EasyLink_Phy_Custom);
  EasyLink_setFrequency(915000000);
}

uint16_t value;
void loop() {
  rxPacket.rxTimeout = EasyLink_ms_To_RadioTime(2000);
  // Turn the receiver on immediately
  rxPacket.absTime = EasyLink_ms_To_RadioTime(0);

  EasyLink_Status status = myLink.receive(&rxPacket);
  C = C + 1;
  if (status == EasyLink_Status_Success) {
    memcpy(&value, &rxPacket.payload, sizeof(uint16_t));

    if (rxPacket.dstAddr[0]==0x1){
      C1=C1+1;
    }
    else{
      C2=C2+1;
    }
    for (int i = 9; i > 0; i--)
    {
      TablaErr[i] = TablaErr[i - 1];
    }
    TablaErr[0] = 0;
  } else
  {
    CET=CET+1;
    for (int i = 9; i > 0; i--)
    {
      TablaErr[i] = TablaErr[i - 1];
    }
  }
}
```

```

    TablaErr[0] = 1;
}
CE = 0;
for (int j = 0; j < 10; j++)
{
    CE = CE + TablaErr[j];
}
Err = CE * 100 / 10;
Serial.print("Dir:"); Serial.print(rxPacket.dstAddr[0], HEX); Serial.print(",");
Serial.print("Value:"); Serial.print(value); Serial.print(",");
Serial.print("Pck.Lenght:"); Serial.print(rxPacket.len); Serial.print(",");
Serial.print("RSSI:"); Serial.print(rxPacket.rssi); Serial.print(",");
Serial.print("Error:"); Serial.print(Err);Serial.print(",");
if (rxPacket.dstAddr[0]==0xa1){
    Serial.print("Pck/Nodo:"); Serial.print(C1);Serial.print(",");
}
else{
    Serial.print("Pck/Nodo:"); Serial.print(C2);Serial.print(",");
}
Serial.print("Pck.Fallido:"); Serial.print(CET);Serial.print(",");
Serial.print("Con.T:"); Serial.print(C);Serial.print(",");
Serial.print("Err.code:"); Serial.println(status);
Serial.flush();
Serial.read();
Serial.write(0x0d);
S3=analogRead(A0);
Serial.print("Dir:");Serial.print(3); Serial.print(",");
Serial.print("Value:");Serial.print(S3); Serial.print(",");
Serial.print("Pck.Lenght:");Serial.print("0"); Serial.print(",");
Serial.print("RSSI:");Serial.print("0"); Serial.print(",");
Serial.print("Error:");Serial.print("0"); Serial.print(",");
Serial.print("Pck/Nodo:"); Serial.print("0"); Serial.print(",");
Serial.print("Pck.Fallido:");Serial.print("0"); Serial.print(",");
Serial.print("Con.T:");Serial.print(C); Serial.print(",");
Serial.print("Err.code:");Serial.println("0");
}

```

Nodos Transmisores:

```

#include "EasyLink.h"
EasyLink_TxPacket txPacket;
EasyLink myLink;
int C = 0;
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    // begin to 625bps Long Range Mode
    myLink.begin(EasyLink_Phy_Custom);
    EasyLink_setRfPwr(14);
}

```

```

EasyLink_setFrequency(91500000);
Serial.println(myLink.version());
txPacket.dstAddr[0] = 0x02;
}
void loop() {
uint8_t value = analogRead(A0);
//C++; //if (C > 255) {C = 0;} //Serial.println(C);
memcpy(&txPacket.payload, &value, sizeof(uint8_t));
txPacket.len = sizeof(uint8_t);
txPacket.absTime = EasyLink_ms_To_RadioTime(0);
EasyLink_Status status = myLink.transmit(&txPacket);
if (status == EasyLink_Status_Success) {
Serial.println("Packet transmitted successfully");
} else {
Serial.print("Transmit failed with status code: ");
Serial.print(status);
Serial.print(" (");
Serial.print(myLink.getStatusString(status));
Serial.println(")");
}
delay(2000);
}

```

ANEXO C

Código Energia IDE con salto de frecuencia en canales con ruido de fondo medido

Nodo Base:

```

#include "EasyLink.h"
#include <stdio.h>
#define LED1 RED_LED
#define LED2 GREEN_LED

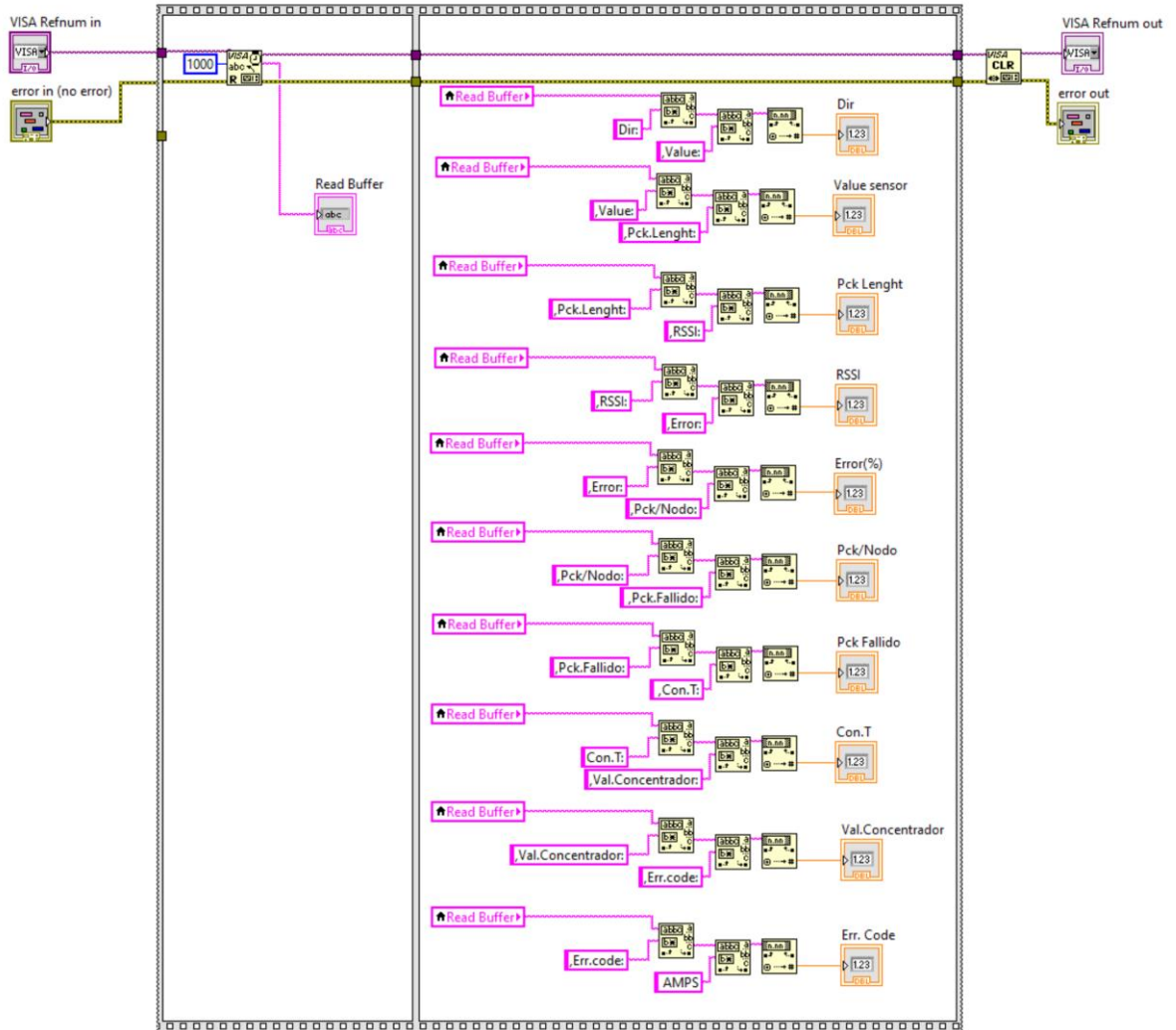
EasyLink_TxPacket txPacket;
EasyLink_RxPacket rxPacket;
EasyLink myLink;
EasyLink_Status status;
int paq=1,aux=0,paqrec=0;
int CE = 0,CET=1;
double Err;
uint16_t value;

void setup()
{
Serial.begin(115200);
myLink.begin(EasyLink_Phy_Custom);
//myLink.begin(EasyLink_Phy_625bpsLrm);
EasyLink_setRfPwr(14);
EasyLink_setFrequency(91200000);
Serial.println(myLink.version());
txPacket.dstAddr[0] = 0x02;

```

```
    Serial.print(" ");
    Serial.println(EasyLink_getFrequency());
    aux--;
}
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
void Frecuencias()
{
int canales[]={900000000, 902000000, 905000000, 906000000, 908000000, 910000000, 912000000,
915000000};
if(aux>7) // 8 canales
{
    aux=0;
}
if(aux<0)
{
    aux=7; // 8 canales
}
int canal = canales[aux];
EasyLink_setFrequency(canal);
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
void transmision()
{
txPacket.absTime = EasyLink_ms_To_RadioTime(0);
digitalWrite(LED1, LOW);
digitalWrite(LED2, HIGH);
Serial.println("Transmitiendo...");
value = paq;
memcpy(&txPacket.payload, &value, sizeof(uint16_t));
// Set the length of the packet
txPacket.len = sizeof(uint16_t);
EasyLink_transmit(&txPacket);
status = myLink.transmit(&txPacket);
freq = EasyLink_getFrequency();
if (status == EasyLink_Status_Success)
{
    Serial.print("Packet transmitted successfully");
    Serial.print(" ");
    Serial.print(freq);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(aux);
    paq++;
    aux++;
}
else
{
    Serial.print("Transmit failed with status code: ");
    Serial.print(status);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(myLink.getStatusString(status));
    Serial.println("");
}
}
}
```

Código Grafico LabVIEW, Sub-VI Datos-V2.



ANEXO F

Producto de trabajo de investigación, artículo en revista.

INGENIERÍA INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA

volumen XXIII (número 1), enero-marzo 2022 1-13

ISSN 2594-0732 FI-UNAM artículo arbitrado

Información del artículo: Recibido: 30 de abril de 2021, reevaluado: 14 de junio de 2021, aceptado: 5 de septiembre de 2021

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) license

<https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2022.23.1.004>

Desarrollo de cama de simulación 3D para RIS en zona urbana de México Development of a 3D simulation bed for WSN in urban area of Mexico

Galicia-Reyes Jorge Iván
Instituto Tecnológico de La Laguna
Tecnológico Nacional de México
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Correo: jorgeigreyes@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0258-8659>

Gómez-Ramírez Emmanuel
Conacyt-Instituto Tecnológico de La Laguna
Tecnológico Nacional de México
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Correo: egomez.ram@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-7104-9520>

Resumen

Trabajar con Redes Inalámbricas de Sensores (RIS) en zonas urbanas es una tarea complicada, se deben tomar en cuenta diversos factores debido a la naturaleza propia del entorno. Es aquí en donde herramientas analíticas como los simuladores juegan un papel importante para el éxito de las redes. El objetivo de este trabajo es contar con un entorno virtual 3D para el simulado de RIS que sea confiable, escalable, modular y robusto que permita dar certidumbre durante el diseño de redes. En este trabajo se presenta el desarrollo de un entorno 3D de la ciudad de Torreón, haciendo uso del simulador de eventos discretos OMNeT++ , con herramientas de INET framework. La cama de simulación 3D comprende una sección de 1 km² de objetos físicos como edificaciones y vegetación, el mapa de la ciudad de Torreón y datos de elevación de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM, por sus siglas en inglés). Se presentan dos casos comparativos entre simulaciones y datos de RIS desplegadas en la ciudad, obteniendo la eficiencia de la red y el indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI), a diferentes distancias entre nodos. El primer caso de estudio corresponde al estándar IEEE 802.15.4 en distancias de 25, 50 y 100 m, y el segundo caso al modo propietario de Texas Instruments Legacy Long Range a 90, 135 y 200 m. Los resultados muestran una coincidencia de 92 % y 95 % en promedio, respectivamente, en paquetes recibidos entre datos simulados y los recolectados con las RIS. En cuanto al RSSI se muestra un comportamiento acorde a lo esperado, debilitándose a mayores distancias. La cama de simulación 3D es una herramienta confiable para simular redes con diferentes niveles de complejidad y escala, facilita tener referencias visuales y permite entender el comportamiento de las RIS que se busquen diseñar, sirviendo de apoyo en los esfuerzos para el monitoreo de calidad de aire que existe en la región.

Descriptores: RIS, OMNeT++, INET framework, OpenStreetMap, OsgEarth, SRTM, Simulación 3D.

Abstract

Working with Wireless Sensor Networks (WSN) in urban areas is a complicated task to perform, where various factors must be taken into account, due to the very nature of the environment. This is where analytical tools such as simulators play an important role for the success of networks. The objective of this work is to have a 3D virtual environment for WSN simulation that is reliable, scalable, modular and robust that allows certainty during network design. This paper presents the development of a 3D environment of the city of Torreón, using the discrete event simulator OMNeT++ , with INET framework tools. The 3D simulation bed comprises a 1 km² section of physical objects such as buildings and vegetation, the Torreón city map and elevation data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Two comparative cases are presented between simulations and WSN data deployed in the city, obtaining the efficiency of the network and the Received Signal Strength Indicator (RSSI), at different distances between nodes. The first case study corresponds to the IEEE 802.15.4 standard at distances of 25, 50 and 100 m, and the second case to the Texas Instruments Legacy Long Range proprietary mode at 90, 135 and 200 m. The results show an agreement of 92 % and 95 % on average respectively in received packets between simulated data and those collected with the WSN. As for the RSSI, it shows a behavior according to expectations, weakening at greater distances. The 3D simulation bed is a reliable tool to simulate networks with different levels of complexity and scale, it facilitates having visual references and allows understanding the behavior of the WSN to be designed, serving as support in the efforts for air quality monitoring that exist in the region.

Keywords: WSN, OMNeT++, INET framework, OpenStreetMap, OsgEarth, SRTM, 3D simulation.

REFERENCIAS

- [1] B. Rashid y M. H. Rehmani, “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, pp. 192-219, 2016. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.09.008>
- [2] M. Saidallah, A. E. Fergougui y A. E. Elalaoui, “A Survey and Comparative Study of Open-Source Wireless Sensor Network Simulators,” *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 7, n° 3, p. 1, 2017.
Disponible:
www.researchgate.net/publication/320518861_A_Survey_and_Comparative_Study_of_Open-Source_Wireless_Sensor_Network_Simulators
- [3] INEGI e IFT, “Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH)”, México, 2021.
- [4] Definición de la Real Academia de Ingeniería de España, Buscar “Telecomunicaciones”. [En línea, 2022] Disponible: <https://diccionario.raing.es/es/lema/telecomunicaci%C3%B3n>
- [5] J. M. Huidobro, “Telecomunicaciones. Tecnologías, Redes y servicios”, 2nd Ed, Bogotá: Ra-Ma, 2015.
- [6] Definición de la Real Academia de Ingeniería de España, Buscar “Comunicación Inalámbrica”. [En línea, 2022] Disponible: <https://diccionario.raing.es/es/lema/comunicaci%C3%B3n-inal%C3%A1mbrica>
- [7] R. Custra, “Fundamentos básicos de telecomunicaciones”, Notas de clase para Introducción a las Telecomunicaciones Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Posgrado en gestión de las telecomunicaciones. Buenos Aires, 2010 [En línea, 2021] Disponible: <https://tesuva.edu.co/phocadownloadpap/Fundamentos%20de%20telecomunicacion.pdf>
- [8] Z. Kamel y S. Mohammad, “Introduction to Wireless Sensor Networks” en: D. Benhaddou, A. Al-Fugaha (eds) *Wireless Sensor and Mobile Ad-Hoc Networks*. Springer, New York, NY. 2015. Disponible: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2468-4_1
- [9] S. Siraj, A. Kumar Gupta y Rinku-Badgujar, “Network Simulation Tools Survey, *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 1, n° 4, p. 201-210, 2012.
Disponible:
<https://www.ijarccce.com/upload/june/3-Network%20Simulation%20Tools%20Survey.pdf>
- [10] A. Singh Toor y A. K. Jain, “survey on Wireless Network Simulators”, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 6, n° 1, p. 62-69, 2017. 10.11591/eei.v6i1.568
- [11] Sitio web Bigminigeek, Buscar “Entornos virtuales” [Consulta en línea, 2022] Disponible: <https://bigminigeek.wixsite.com/bigminimentor/single-post/2018/09/15/Entornos-Virtuales>
- [12] J. F. Rocha, “Monitoreo Trimestral de la Calidad de Aire”, Dirección General del Medio Ambiente, Torreón, Coahuila, México, 2015. [En línea, 2019] Disponible:

<http://www.trcimplan.gob.mx/blog/calidad-del-aire-en-torreon-y-sus-efectos-en-la-aplicacsalud/monitoreo-trimestral-de-la-calidad-del-aire.jpg>

[13] Sitio web oficial Organización Mundial de la Salud, Buscar “Nueve de cada diez personas de todo el mundo respira aire contaminado” [Consulta en línea, 2020] Disponible: <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

[14] A. Vargas, “Calidad de aire en torreon y sus efectos en la salud”, IMPLAN, Instituto Municipal de planeacion y competitividad de Torreon, Mexico, 2015 [En línea] Disponible: <http://www.trcimplan.gob.mx/blog/calidad-del-aire-en-torreon-y-sus-efectos-en-la-salud.html>

[15] C. Zhu, C. Zheng, L. Shu y G. Han, “A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks”. Journal of Network and Computer Applications, vol. 35, n° 2, p. 619-632, 2012. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2011.11.016>

[16] L. Mészáros, A. Varga y M. Kirsche, “INET Framework”. En A. Virdis y M. Kirsche (eds), Recent Advances in Network Simulation: The OMNeT++ Environment and its Ecosystem, Springer International Publishing, p.93-94, New York, NY, 2019

[17] Imagen tomada del manual de OMNeT++, Buscar “Simple and compound modules figure”. [En línea, 2021] Disponible: https://doc.omnetpp.org/omnetpp/manual/#toc_1

[18] Sitio web oficial OMNeT++, Buscar “NED Overview” en el manual de OMNeT++. [En línea, 2021] Disponible: https://doc.omnetpp.org/omnetpp/manual/#toc_1

[19] Sitio web oficial OMNeT++, Buscar “The QTENV graphical environment” en el guía de usuario de OMNeT++. [En línea, 2021] Disponible: <https://doc.omnetpp.org/omnetpp/UserGuide.pdf>

[20] Sitio web oficial INET framework, Buscar “Introduction”. [En línea, 2021] Disponible: <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>

[21] Sitio web oficial INET framework, Buscar “Showcase visualizer”. [En línea, 2022] Disponible: <https://inet.omnetpp.org/docs/showcases/visualizer/osg/earth/doc/index.html>

[22] Sitio web oficial OpenSceneGrph, Buscar “Home page”. [En línea, 2022] Disponible: <http://www.openscenegraph.com/>

[23] Sitio web oficial OSGEARTH, Buscar “The OsgEarth File”. [En línea, 2021] Disponible: <http://docs.osgearth.org/en/latest/earthfile.html>

[24] Sitio web oficial EarthData de la NASA, Buscar “NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second [Data set]” [En línea, 2019] Disponible: <https://doi.org/10.5067/MEaSURES/SRTM/SRTMGL1.003>

[25] P. Misra, W. Takeuchi y R. Avtar, “Comparison of digital building height models extracted from AW3D, TanDEM-X, ASTER, and SRTM digital surface models over Yangon City”, Remote sensing, 2018. Disponible: <https://doi.org/10.3390/rs10122008>

- [26] J. R. Santillan y M. Makinano-Santillan, “Vertical accuracy assessment of 30-m resolution alos, aster, and srtm global dems over northeastern mindanao, philippines”, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLI-B4*, p. 149, 2016. Disponible: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B4-149-2016>
- [27] Sitio web INET Framework, Buscar “*Visualizing Terrain and Urban Environment*” [En línea, 2020] Disponible: <https://inet.omnetpp.org/docs/showcases/visualizer/osg/earth/doc/index.html>
- [28] Sitio web OMNeT++ framework, Buscar “DielectricObstacleLoss” en el módulo de INET” [En línea, 2019] Disponible: <https://doc.omnetpp.org/inet/api-current/neddoc/inet.physicallayer.obstacleloss.DielectricObstacleLoss.html>
- [29] Sitio web Simu5G, Buscar “Pagina de inicio” [En línea, 2021] Disponible: <http://simu5g.org/>
- [30] Sitio web Omnetpp Groups de Google, Buscar “Simu5G is out” [En línea, 2021] Disponible: <https://groups.google.com/g/omnetpp/c/E51MfkiJTA0/m/BVHbFumzAAAJ>
- [31] G. Nardini, Sabella, G. Stea, P. Thakkar y A. Vardis, “Simu5G – An OMNeT++ library for end-to-end performance evaluation of 5G networks”, *IEEE Access*, 2020. Disponible: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028550>
- [32] M. Saidallah, A. E. Fergougui y A. E. Elalaoui, “A Survey and Comparative Study of Open-Source Wireless Sensor Network Simulators”. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2017. Disponible: www.researchgate.net/publication/320518861_A_Survey_and_Comparative_Study_of_Open-Source_Wireless_Sensor_Network_Simulators
- [33] A. U. Khan, S. M. Bidal y M. Othman, “A Performance Comparison of Network Simulators for Wireless Networks”. *IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 2012. Disponible: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1307/1307.4129.pdf>
- [34] M. A. Khan, H. Hasbullah y B. Nazir, “Recent Open Source Wireless Sensor Network Supporting Simulators: A Performance Comparison”, *IEEE 2014 International Conference on Computer, Communication, and Control Technology*, 2014. Disponible: <http://doi.org/10.1109/I4CT.2014.6914198>
- [35] A. Bounceur, L. Clavier, P. Combeau, O. Marc, R. Vauzelle, A. Masserann...M. Lounis, “CupCarbon: A New Platform for the Design, Simulation and 2D/3D Visualization of Radio Propagation and Interferences in IoT Networks”. *IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference*, 2018. Disponible: <http://doi.org/10.1109/CCNC.2018.8319179>
- [36] S. H. Adil, A.A Aziz, T. Akber, M. Ebrahim, S. S. Ali y K. Raza, “3D Smart City Simulator”, 2017. Disponible: <http://doi.org/10.1109/ROMA.2017.8231826>
- [37] V. Vujović y M. Maksimović, “Raspberry Pi as a Wireless Sensor node: Performances and constraints”, *37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, p.1013-1018, 2014. Disponible: [IEEE. doi:10.1109/MIPRO.2014.6859717](http://doi.org/10.1109/MIPRO.2014.6859717)
- [38] Sitio web Texas Instruments, Buscar “CC1350” [En línea, 2021] Disponible: https://www.ti.com/product/CC1350?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=epd-

null-null-gpn_en-cpc-pf-google-
wwe&utm_content=cc1350&ds_k=%257b_dssearchterm%257d&DCM=yes&gclid=CjwKCAjwzeqV
BhAoEiwAOrEmzUZMBg8Ujp6lSOS5c5pFwoeFD1ooVZIMwARJVPNdWJMMy36muqWP5QBoCYk
QQAyD_BwE&gclsrc=aw.ds

[39] R. Ricalde Menchaca, “Diseño de nodo sensor de CO2 para el monitoreo ambiental”, Tesis de maestría, ISSN:000-000, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreon, Coahuila, Mexico, 2020.

[40] Sitio web Pulse Electronics, Buscar “W5017” [En línea, 2019] Disponible: <https://productfinder.pulseelectronics.com/product/w5017>

[41] Sitio web Pulse Electronics, Buscar en productos “W5012 W5017” [En línea, 2019] Disponible: <https://productfinder.pulseelectronics.com/api/open/product-attachments/datasheet/w5012>

[42] L. Robles, “Carcasa protectora de los componentes electronicos para la medicion del calidad de aire”, Tesis de licenciatura, Universidad La Salle Laguna, Torreon, Coahuila, Mexico, 2020.

[43] Sitio web Z-Wave, Buscar “Home page” [En línea, 2021] Disponible: <https://www.z-wave.com/>

[44] Sitio web predictable designs, Buscar “Comparison of Wireless Technologies: Bluetooth, WiFi, BLE, Zigbee, Z-Wave, 6LoWPAN, NFC, WiFi Direct, GSM, LTE, LoRa, NB-IoT, and LTE-M” [En línea, 2021] Disponible: <https://predictabledesigns.com/wireless-technologies/bluetooth-wifi-zigbee-gsm-lte-lora-nb-iot-lte-m/>

[45] Sitio web Instituto Federal de Telecomunicaciones, Buscar “El espectro radioeléctrico en México. Estudio y acciones. Acuerdo SCT 130306, DOF 13/03/2006”. P. 84, Mexico [En línea, 2020] Disponible: <http://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/el-espectro-radioelectrico-en-mexico-estudio-y-acciones>

[46] Sitio web Instituto Federal de Telecomunicaciones, Buscar “Inventario de bandas de frecuencias clasificadas como espectro libre”, P. 15, México [En línea, 2020] Disponible: <http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/inventariodebandasdefrecuenciasdeusolibrev.pdf>

[47] Sitio web Texas Instruments, Buscar “EasyLink API reference”, [En línea, 2021] Disponible: https://software-dl.ti.com/simplelink/esd/simplelink_cc13x0_sdk/4.10.02.04/exports/docs/proprietary-rf/proprietary-rf-users-guide/proprietary-rf-guide/easylink-index.html

[48] Sitio web Energia IDE, Buscar “Home page”, [En línea, 2021] Disponible: <https://energia.nu/>

[49] Sitio web Energia IDE, Buscar “EasyLink”, [En línea, 2021] Disponible: <https://energia.nu/guide/libraries/easylink/>

[50] G. Holguín, S. Perez, A. Orozco, “Curso Básico LabVIEW 6i”, ISBN: 958-8065-33- X, Universidad tecnológica de Pereira, Pereira, Risaralda, COL, 2002. [Documento en línea, 2015] Disponible: <http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/Labview/ParaAprender/Curso%20LabVIEW6i.pdf>

[51] Sitio web National Instruments, Buscar “NI-VISA” [Consulta en línea, 2021], Disponible: <https://www.ni.com/es-mx/shop/software/products/ni-visa.html>

- [52] Sitio web Texas Instrumentes, Buscar “SmartTF Studio” [Consulta den línea, 2019] Disponible: <https://www.ti.com/tool/SMARTRFTM-STUDIO>
- [53] S. Hellan, “CC13XX Long Range Modes”, Reporte de aplicación, 2018. Disponible: <https://www.ti.com/tool/SMARTRFTM-STUDIO>
- [54] Sitio web ADATA, Buscar “Bateria externa P20000QCD”. [Consulta en línea, 2019] Disponible: https://www.adata.com/storage/downloadfile/Datasheet-P20000QCD_EN_20200807.pdf
- [55] Sitio web ADATA, Buscar “Bateria externa P5000”. [Consulta en línea, 2019] Disponible: https://www.adata.com/storage/downloadfile/Datasheet-P5000%20Power%20Bank_20180917.pdf
- [56] W. Sun y X. Yuan, “End-toEnd Data Delivery Reliabilty Model for Estimating and Optimizing the Link Quality of Industrial WSNs”, en IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 15, no. 3, p. 1127-1137, Julio 2018, doi: 10.1109/TASE.2017.2739342.
- [57] Sitio web International Telecommunication Union, Buscar “P.372: Radio noise”, [Consulta en línea, 2021], Disponible: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.372-15-202109-I/en>
- [58] Sitio web Texas Instruments, Buscar “SmartRF Studio 7 Hands-On User Guide and Tutorial” [Consulta en línea, 2020]. Disponible: <https://www.ti.com/lit/ug/swru194b/swru194b.pdf?ts=1658714151312>
- [59] Sitio web TI support, Buscar “CC1125DK: Distance test procedure” [Consulta en línea, 2020]. Disponible: <https://e2e.ti.com/support/wireless-connectivity/sub-1-ghz-group/sub-1-ghz/f/sub-1-ghz-forum/859171/cc1125dk-distance-test-procedure>
- [60] Sitio web National Instruments, Buscar “LabVIEW MathScript RT module”. [Descarga en línea 2020] Disponible: <http://www.ni.com/labview/mathscript/esa/>
- [61] Jorge Galicia Reyes, “Aplicación para control vía remota, integración de sensores y sistema de riego a invernadero de pruebas automático para el monitoreo de plantas”, Tesis de Maestría, ISSN: 018-960, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coah, MX, 2015.
- [62] Iván López Mercado, “Implementación de la comunicación en WSN con modulación en espectro ensanchado”, Tesis de Maestria, ISSN: 000-000, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coah., MX, 2020.
- [63] *Telecomunicaciones-Radiocomunicación-Sistemas de radiocomunicación que emplean la técnica de espectro disperso-Equipos de radiocomunicación por salto de frecuencia y por modulación digital a operar en las bandas 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz y 5725-5850 MHz* Especificaciones, límites y métodos de prueba. NORMA Oficial Mexicana NOM-121-SCT1- 2009, Diario Oficial de la Federación, 21 de junio del 2010.