



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO DEL DESPLIEGUE DE REDES DE SENSORES PARA
EL MONITOREO DE UN PARQUE EN LA CIUDAD DE
GUAYAQUIL”

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES**

PAUL ANÍBAL VALLEJO GUERRA

CARLOS LUIS BONE ALCÍBAR

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a DIOS por cada día de vida, por escuchar mis oraciones y a través de las mismas enseñarme a ser paciente y perseverante en todo lo que me propongo. A mis padres su apoyo, la confianza y a pesar de los momentos difíciles nunca dejaron de creer en mí, gracias a su gran sacrificio y darme la oportunidad de estudiar en la mejor universidad del país. A todas las personas que me han ayudado e incentivado a lo largo de esta meta, en especial agradecer a mi tutor de proyecto Msc. Jorge Gómez por su paciencia, su predisposición y sus consejos durante este proceso de aprendizaje. Agradeciendo también al Msc. Carlos Valdivieso por guiarnos en la culminación de este proyecto.

Carlos Luis Bone Alcívar

Mis más sinceros agradecimientos a Dios por ser mi guía, y permitirme cumplir todos los logros que he alcanzado. Un profundo agradecimiento a mis padres porque son el pilar de mi vida, quienes me apoyan en todas las decisiones que tomo y a quienes dedico todos mis éxitos. A mi familia, por su cariño, amor y por todos los valores que inculcaron en mí, que ayudaron a moldearme como ser humano y prepararme ante la sociedad. Agradezco también al Msc. Jorge Gómez y al Msc. Carlos Valdivieso por sus consejos que ayudaron a la culminación del presente proyecto, y a todos mis maestros de ESPOL por compartirme sus conocimientos, y haberme guiado durante toda mi vida universitaria

Paul Aníbal Vallejo Guerra

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

Carlos Valdivieso Armendáriz, MsC.

PROFESOR EVALUADOR

Miguel Molina Villacís, MsC.

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

Paul Aníbal Vallejo Guerra

Carlos Luis Bone Alcívar

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza el diseño de una red WSN basado en el protocolo ZigBee para el monitoreo de los diferentes factores que conforman los ambientes nocivos para la salud humana como: índices de radiación ultravioleta (UVI), altos niveles de ruido y los diferentes gases tóxicos provenientes de los vehículos, con el fin de constituir un sistema efectivo y eficiente para el monitoreo, prevención y control de la contaminación atmosférica.

En el segundo capítulo se realiza una breve introducción sobre Smart Cities y adicionalmente se explican los diferentes estándares, topologías y protocolos de comunicación, que participan en las redes de sensores inalámbricos.

En el tercer capítulo, para el diseño de la red, se realizará primero una identificación y análisis de la zona para poder establecer los diferentes parámetros que participarán en el sistema de comunicación, y a su vez se determinará de manera estratégica los puntos en donde se ubicaran los diferentes nodos que se van a emplear.

Para el hardware se hará uso del modelo Waspote para los nodos finales y el modelo Meshlium para los dispositivos coordinadores, ambos pertenecientes a la empresa Libelium, debido a que estos dispositivos ofrecen varias ventajas para aplicaciones en el campo ambiental.

También, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones mediante el software Matlab, y se verifica que todos los enlaces entre los dispositivos de la red se cumplan. Además, se presentan las gráficas CDF, que permiten observar el comportamiento que tiene el sistema de comunicación ante los diferentes escenarios planteados. Finalmente, en el Anexo 1 se muestran 2 versiones de código fuente, el primero que simula los enlaces establecidos entre los dispositivos finales y coordinador de cada clúster, el segundo que simula los enlaces establecidos entre los dispositivos coordinadores. Adicionalmente en el Anexo 2 se detalla la validación código antes mencionado.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iii
DECLARACIÓN EXPRESA.....	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
CAPÍTULO 1.....	11
1. PLANTAMIENTO DE LA PROBLEMATICA.....	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Problemática	12
1.3. Justificación	13
1.4. Objetivos	14
1.4.1. Generales:	14
1.4.2. Específicos:	14
1.5. Metodología	15
1.6. Alcance	17
CAPÍTULO 2.....	18
2. ESTADO DEL ARTE MUNDIAL.....	18
2.1. Smart Cities	19
2.1.1. Introducción a Smart City	19
2.1.2. Definición y características de Smart City	19
2.1.3. Smart Enviroment	21

2.2.	Introducción a las Redes de Sensores Inalámbricos	22
2.2.1.	Definición, Arquitectura y Características de WSN	22
2.2.2.	Características de las WSN:	23
2.2.3.	Ventajas y Desventajas	24
2.2.3.1.	Ventajas	24
2.2.3.2.	Desventajas	25
2.3.	Tecnologías y Estándares Inalámbricos	25
2.3.1.	Estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee IEEE, 2003)	27
2.3.2.	Arquitectura de una LR-WPAN	28
2.3.3.	Capa Física (PHY)	29
2.3.4.	ZigBee	30
2.3.4.1.	Tipos de Dispositivos de ZigBee	30
2.3.4.2.	Topología de la Red ZigBee	31
2.3.5.	Estudios realizados sobre sensores inalámbricos	33
	CAPÍTULO 3	35
3.	MODELAMIENTO, METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO	35
3.1.	Descripción del Escenario	35
3.2.	Descripción de la metodología	37
3.2.1.	Descripción del Algoritmo	39
3.3.	Modelamiento de Datos	42
	CAPÍTULO 4	45
4.	DISEÑO DE LA RED Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
4.1.	Localización geográfica del escenario.	45

4.2.	Diseño estructural de la red	46
4.3.	Criterios de Selección de las motas	48
4.3.1.	Selección de los sensores.....	51
4.4.	Comprobación de LOS y Zona Fresnel.....	54
4.5.	Parámetros de Configuración	55
4.6.	Análisis de Resultados	56
4.6.1.	Enlaces entre nodos finales y coordinadores	58
4.6.1.1.	Escenario con Pnoise = -68 dBm	58
4.6.1.2.	Escenario con Pnoise = -72 dBm	60
4.6.1.3.	Escenario con Pnoise = -80 dBm	61
4.6.2.	Enlaces entre nodos coordinadores.....	64
4.6.2.1.	Escenario con Pnoise = -68 dBm	64
4.6.2.2.	Escenario con Pnoise = -72 dBm	65
4.6.2.3.	Escenario con Pnoise = -80 dBm	66
4.6.3.	Análisis de las funciones CDF	69
4.6.3.1.	CDF empírica para Capacidad Máxima del Canal	69
4.6.3.2.	CDF empírica para Capacidad Máxima del Canal	70
4.6.3.3.	CDF empírica para SNR	71
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama del proceso.....	16
Figura 2.1: Características de una Smart City	20
Figura 2.2: Elementos de una Red WSN	23
Figura 2.3: Ventajas de las WSN.....	24
Figura 2.4: Desventajas de las WSN.	25
Figura 2.5: Arquitectura de una red LR – WPAN	28
Figura 2.6: Disposición de los canales en la Banda de 2.4GHz.....	30
Figura 2.7: Topología estrella	31
Figura 2.8: Topología árbol.....	32
Figura 2.9: Topología Mesh	33
Figura 3.1: Parque / escenario semiurbano	36
Figura 3.2: Estructura de canales IEEE 802.15.4	36
Figura 3.3: Diagrama de Bloques – Metodología.....	37
Figura 3.4: Diagrama de Flujo del Algoritmo utilizado.....	41
Figura 4.1: Captura del Parque Samanes obtenida por “Google Maps”.	46
Figura 4.2: Topología de la red.....	47
Figura 4.3: Montaje de placas Arduino Mega y XBee-Pro	51
Figura 4.4: Puertos para conexión de sensores.....	51
Figura 4.5: Posicionamiento de nodos por clusters.	57
Figura 4.6: Enlaces establecidos en la red con Pnoise = -68dBm	58
Figura 4.7: Enlaces establecidos en la red con Pnoise = -72dBm	60
Figura 4.8: Enlaces establecidos en la red con Pnoise = -80dBm	61
Figura 4.9: Escenario con Pnoise = -68dBm y Ptx = 17dBm	62
Figura 4.10: Escenario con Pnoise = -68dBm, Ptx = 17dBm y Gt/rx = 8dBi.	63
Figura 4.11: Enlaces entre dispositivos coordinadores Pnoise = -68dBm. ...	64
Figura 4.12: Enlaces entre dispositivos coordinadores Pnoise = -72dBm. ..	65
Figura 4.13: Enlaces entre dispositivos coordinadores Pnoise = -80dBm. ...	66
Figura 4.14: Escenario con Pnoise = -68dBm y Pt/rx = 17dBm.....	67

Figura 4.15: Escenario con $P_{noise} = -68\text{dBm}$, $P_{tx} = 17\text{dBm}$ y $G_{t/rx} = 8\text{dBi}$.	68
Figura 4.16: CDF empírica de Throughput	69
Figura 4.17: CDF empírica de Capacidad máxima del Canal.	70
Figura 4.18: CDF empírica de SNR	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Indicadores de Smart Environment.....	21
Tabla 2: Comparación entre tecnologías inalámbricas	26
Tabla 3: Características de una LR - WPAN.....	27
Tabla 4: Tabla de Ingeniería de los Nodos.	45
Tabla 5: Características técnicas del ATmega1281.....	49
Tabla 6: Características técnicas del módulo XBee-802.15.4-Pro	50
Tabla 7: Especificaciones Técnicas Sensor de Temperatura SHT3x.	52
Tabla 8: Especificaciones Técnicas Sensor Libelium Gases Pro.....	53
Tabla 9: Características técnicas del Sensor SU-100.....	53
Tabla 10: Características técnicas del sensor de ruido.....	54
Tabla 11: Configuraciones físicas de los nodos.....	56
Tabla 12: Parámetros de Radiofrecuencia.....	56
Tabla 13: Colores según velocidad de transmisión.....	57

CAPÍTULO 1

En el presente capítulo se describirá el problema a tratar y la solución propuesta. Adicionalmente se establecerán los objetivos tanto generales como específicos, la metodología de resolución y el alcance del proyecto.

1. PLANTAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA.

1.1. Antecedentes

La contaminación atmosférica empezó cerca de la década de los setenta, y en la actualidad es un grave problema que incrementa día a día en todo el mundo, especialmente en grandes urbes con más de un millón de habitantes. Los índices de polución actualmente son muy altos en capitales de países como: China, Irán, Mongolia, Pakistán, India, Arabia Saudita, Egipto, Bangladesh, Rusia, México, Estados Unidos, entre otros [1]. A consecuencia de esto se consideran las ciudades con mayor contaminación atmosférica, siendo esto corroborado mediante un estudio emitido en el año 2011 por la Organización Mundial de Salud (OMS) [2].

Un evidente ejemplo de una ciudad con un elevado índice de polución atmosférica es Pekín, una de las ciudades más pobladas del mundo, cuyo entorno frecuentemente se encuentra cubierto bajo una densa capa de humo, y como consecuencia sus habitantes no gozan de una calidad del aire apta para respirar [2].

Por otro lado, Ahvaz lidera la lista como la ciudad más contaminada del mundo, debido a la excesiva destilación de petróleo, elaboración de metales y gas, provocando un alto índice de contaminación al medio ambiente [3].

De manera similar Ulan Bator es la segunda ciudad más contaminada del mundo, dado que el setenta por ciento del smog es producido en el invierno por la calefacción de leña.

Entre otros ejemplos de ciudades que sufren de contaminación tenemos a: Lahore, ciudad en que la contaminación es dramática por el tráfico excesivo y la

incineración de basura, En Nueva Delhi las emisiones procedentes de centrales carboníferas contribuyen permanente a la polución. La potente radiación del sol en Riad transforma la suciedad que proviene de las emisiones de la industria y el tráfico en ozono. La nociva calidad del aire en el Cairo provoca enfermedades crónicas en las vías respiratorias y cáncer de pulmón. En Dhaka, según investigadores posee la concentración de azufre más alta del mundo y finalmente en Moscú la contaminación de su aire se debe en gran medida a la alta concentración de hidrocarburos [3].

Actualmente en el continente americano, la Ciudad de México presenta elevados niveles de polución debido al alto contenido de ozono, azufre e hidrocarburo [4].

En Sudamérica ciudades como Santiago de Chile, Medellín, Cochabamba y otras, presentan una alta concentración de contaminantes en su aire [5]. Con respecto a Ecuador las ciudades como Guayaquil, Quito, Esmeraldas y Cuenca en los años setenta presentaban índices de baja calidad del aire debido a los elevados niveles de contaminación. Hoy en día, la ciudad de Guayaquil con aproximadamente tres millones de habitantes sufre un aumento en su parque automotor y actividades relacionadas al comercio a causa de su gran densidad poblacional. La gran cantidad de circulación de vehículos provoca la polución por ruido y a su vez éstos emiten gases que contribuyen a la contaminación atmosférica, así mismo el sector industrial, debido a la combustión de hidrocarburos que estos emanan. Por los motivos ya mencionados, en el Ecuador organismos como el Ministerio del Ambiente, la OMS y la OPS, trabajan en conjunto en proyectos y programas para evaluar la calidad del aire no sólo en la parte céntrica de la urbe, sino también hacia espacios abiertos, tales como áreas verdes, parques o zonas de recreación [6].

1.2. Problemática

La sobreexposición a ambientes nocivos para la salud humana tiene fuerte repercusión y sólida correlación con el incremento de problemas de salud en personas que residen en entornos tanto urbanos, rurales como industriales. Se llama sobreexposición en ambientes dañinos a la prolongada exposición solar

(Radiación UV), las distintas fuentes de emisión de Gases, contaminación atmosférica y contaminación por ruido.

Ecuador geográficamente se encuentra sobre la línea Ecuatorial terrestre donde la capa de ozono es mucho más delgada y la incidencia de los rayos UV más intensa. La Organización Mundial de la Salud y la Organización Meteorológica Mundial han establecido que el máximo tolerable es de 11 UVI (Índice Ultra Violeta), por tanto, la sobreexposición a este tipo de radiación en ciudades como Guayaquil y Quito puede producir, a mediano plazo, problemas como cáncer a la piel, diversos tipos de ceguera, debilitamiento del sistema inmunológico y otras enfermedades. Lo antes mencionado se debe a que los niveles de radiación ultravioleta detectados por imágenes satelitales superan los 14 UVI para Guayaquil y los 24 para Quito según la Agencia Espacial Civil Ecuatoriana (EXA) [7].

Permanecer largos períodos de tiempo expuestos en escenarios ambientales dañinos afectan directamente a la salud, el situarse en sectores cercanos a grandes concentraciones industriales y al tráfico vehicular, trae consigo gases tóxicos producidos por la combustión de hidrocarburos en el sector industrial y automotriz, inclusive los niveles de ruido que ocasionan los automotores se ven superados a los ya establecidos como tolerables para el ser humano, siendo más propensos a dolor del oído, la irritación de ojos y vías respiratorias, sequedad en mucosas y destrucción de plantas y animales [8].

La sobreexposición en un parque ubicado en el norte de la ciudad de Guayaquil no debería representar riesgo alguno para la salud de la afluencia de usuarios que frecuentan a diario el parque, pero analizando su entorno urbano, abierto y las circunstancias ambientales que lo rodean lo hacen nocivo.

1.3. Justificación

Dado los problemas mencionados en el inciso anterior sobre la exposición a ambientes nocivos para la salud, existen diferentes estrategias aplicables que permitan asegurar la reducción de las concentraciones contaminantes o que se mantengan por debajo de un umbral específico, o en general, en rangos

aceptables para la proteger la salud humana, los cuales se deben basar en un sistema efectivo y eficiente para la prevención, vigilancia y control de la contaminación atmosférica. Ecuador cuenta con pocas investigaciones sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud de las personas, estos temas no han sido incluidos en los programas de desarrollo urbano y no se han llevado a cabo estudios epidemiológicos relacionados con la contaminación del aire [9].

Los parques constituyen un área desprotegida ante los problemas previamente expuestos, debido a que son lugares abiertos que permiten prolongada exposición a ambientes nocivos para la salud, por tal motivo será el punto focal para el diseño de un sistema de prevención, que permita monitorear de manera eficientemente ciertos parámetros influyentes en la contaminación ambiental e índices de radiación UV, con el fin de alertar a los usuarios y a la población en general sobre los niveles diarios a los que se estaría expuesto.

Con respecto a lo antes mencionado, es incentivo suficiente el diseño de una red WSN con acceso a la red de telefonía móvil y al internet, dado que la ventaja de estos sistemas es su alta escalabilidad de red y bajo costo de implementación, de manera que se busque mantener informado sobre los índices de polución antes expuestos e índices de radiación UV que se presenten en la zona de análisis. Los resultados que se generen con una precisa y efectiva monitorización, beneficiaran de manera directa a la población, al país y al medio ambiente [9].

1.4. Objetivos

1.4.1. Generales:

- Diseñar una Red de Sensores Inalámbricos, con el fin de monitorear indicadores atmosféricos en un parque en el norte de la ciudad de Guayaquil.

1.4.2. Específicos:

- Consultar con expertos para identificar el tipo de parámetros que se miden en estos escenarios.

- Localizar la posición geográfica de los nodos usando tecnología GPS.
- Elección de la mota o sensor inalámbrico, cuyas características técnicas se adapten a los requerimientos que se tienen.
- Selección del Gateway y diseño de la red WSN.
- Elegir el modelo de propagación apropiado para el diseño la red WSN.
- Simular y analizar el desempeño de la red WSN.

1.5. Metodología

Con la finalidad de llevar cabo los objetivos anteriormente planteados, se muestra en la Figura 1.1 un diagrama de proceso del cual se puede detallar lo siguiente:

Como punto de partida se realizará la búsqueda de expertos en el tema referente a la contaminación atmosférica, para así poder identificar el tipo de parámetros que se miden en estos escenarios.

Una vez obtenida toda esta información se procederá mediante un GPS, localizar cada una de las posiciones geográficas donde se proyecte la ubicación de los nodos, para de esa manera realizar el diseño del conjunto sensor y transmisor (mota) que se ajusten a los requerimientos que se tengan. Se realizará una revisión bibliográfica para analizar las diferentes opciones de acuerdo a las características técnicas que se requieran para la elección de un óptimo dispositivo que sirva de Gateway para la transferencia de datos recolectados hacia la nube. De igual manera se realizará el diseño estructural en donde se alojarán los dispositivos usados, de manera que sean capaces de soportar la exposición ante diferentes condiciones atmosféricas que se presenten en el lugar.

La simulación de la red seguirá el modelo de propagación más adecuado al entorno de análisis para de esa manera lograr un óptimo despliegue de los equipos de transmisión previamente seleccionados. Con la ayuda de softwares de simulación, elegido el conjunto transmisor sensor y los puntos geográficos previamente ubicados, se procederá a realizar la simulación del escenario

controlado, el cual me va a permitir observar y analizar el comportamiento de la red.

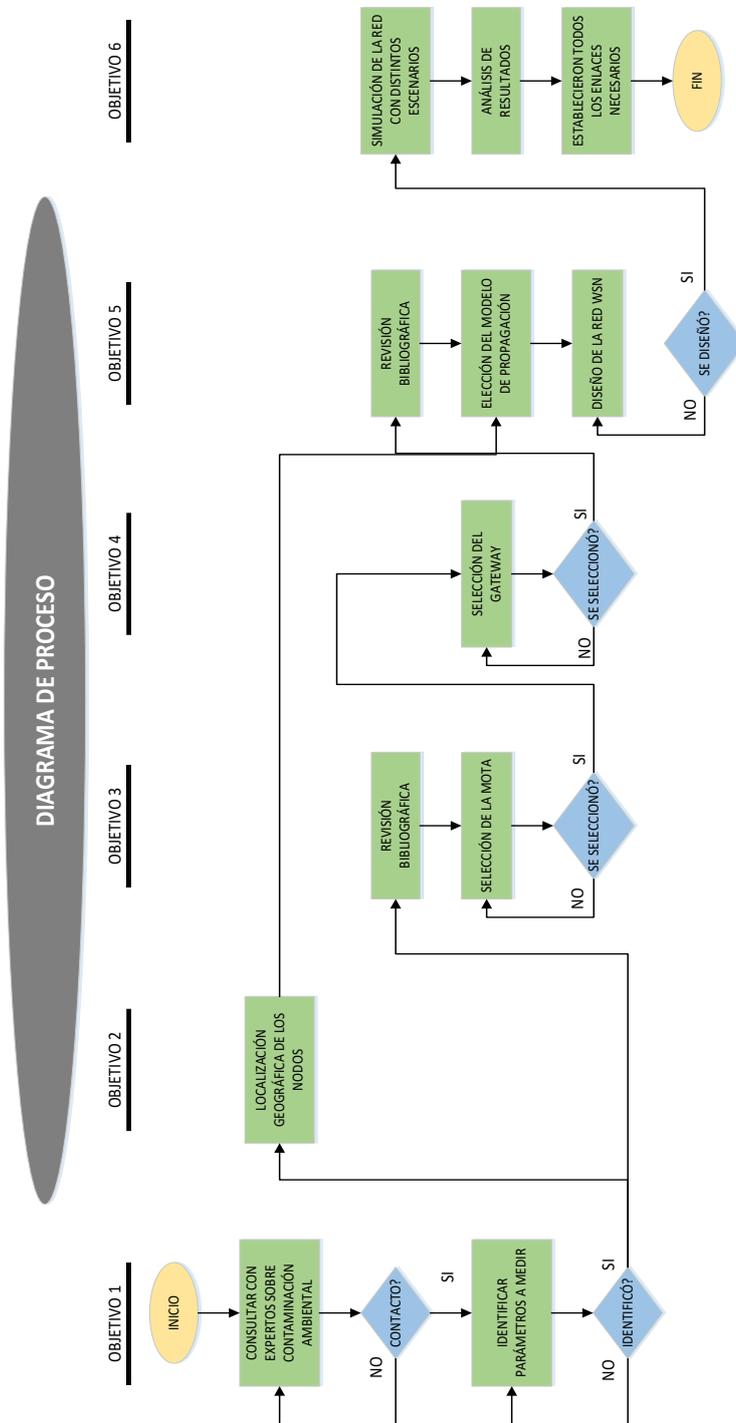


Figura 1.1: Diagrama del proceso

1.6. Alcance

Mediante la simulación de la red haciendo uso de los mejores equipos y basándose en un entorno real de monitoreo, se espera que este modelo sirva de guía para una futura implementación con mayor cobertura, es decir que dicha red se despliegue en una urbanización, un cantón, o incluso que sirva de mecanismo de prevención en una ciudad, optimizando así otros métodos que se han implementado en distintas ciudades de Latinoamérica, en las cuales se emplean biodiindicadores como método de medición, basándose en los efectos de la contaminación atmosférica sobre organismos vivos.

Adicional a lo antes mencionado, se busca que mediante el monitoreo continuo del entorno, esta red sea capaz de formar una base de datos óptima para la creación de un modelamiento estadístico, que permita predecir futuros comportamientos sobre los índices de incidencia solar y de contaminación ambiental en un sector determinado.

CAPÍTULO 2

En el apartado anterior, se mencionó la problemática, los objetivos, la metodología y el alcance, con el fin de llevar a cabo los objetivos planteados. En este capítulo se dará a conocer todo el soporte teórico que incluye una breve descripción del estado del arte, conceptos elementales sobre tecnologías inalámbricas y estudios realizados.

2. ESTADO DEL ARTE MUNDIAL

Las tecnologías inalámbricas hoy en día se han convertido en un foco de estudio debido a una alta gama de aplicaciones que a esta se le pueden adjudicar. Un claro ejemplo es la implementación de proyectos de Smart Cities los cuales se han proliferado en varias ciudades del mundo, siendo las Redes de Sensores Inalámbricas (Wireless Sensor Network) su componente fundamental, ya que su enfoque es orientado a la seguridad de las personas dado que este tipo de sensores permiten mantener un monitoreo constante en las áreas de interés. [10]

Varios estudios que se han realizado para llevar a cabo la implementación de Smart Cities se han enfocado en varios factores tales como: la contaminación ambiental, los elevados índices de rayos ultravioletas, la polución por ruido, entre otros, ya que estos son los principales partícipes que generan un entorno perjudicial para la salud de las personas. Por lo dicho anteriormente ciertas ciudades ya han tomado la iniciativa con la finalidad de brindar una solución a los problemas que ocasionan los factores mencionados. Como ejemplo de aquello en la Comunidad Valenciana se ha implementado una red de estaciones (sensores) que permite realizar un seguimiento de los niveles de contaminación atmosférica en las principales áreas urbanas e industriales [11]

Por otro lado, en la ciudad de Málaga, se ha implementado una red de sensores que permite realizar mediciones de las industrias, tráfico de coches o la calefacción doméstica para generar mapas de contaminación [12]. Otros ejemplos son donde a partir del nivel de concentración determina la polución en una calle.

Por lo que se puede concluir que las redes de sensores inalámbricos en la actualidad contribuyen en nuestra vida y en el desarrollo de tecnologías, siendo esenciales en el monitoreo y aplicación en diferentes campos.

2.1. Smart Cities

2.1.1. Introducción a Smart City

El término Smart City es un nuevo arquetipo visto desde el punto de vista ambiental para el desarrollo de ciudades sostenibles, que surgió desde hace 20 años con el propósito de mejorar la calidad de vida de las personas sin afectar o alterar el medio ambiente, mediante la utilización de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) como una herramienta para su desarrollo [13].

Esta nueva iniciativa se encamina hacia el desarrollo futuro de las ciudades, siendo su principal objetivo el de dar respuesta a problemas como: la contaminación atmosférica, contaminación por ruido, elevados índices de radiaciones ultravioletas, el aumento demográfico en las poblaciones entre otros [14]. Por ello las Smart Cities constituyen un instrumento esencial para garantizar un futuro sostenible en el que los recursos sean aprovechados de manera eficiente y permitir la minimización del impacto en el medio ambiente de las actividades humanas [15].

2.1.2. Definición y características de Smart City

Smart City es un concepto de estudio muy amplio, del que se derivan varias definiciones, las cuales tiene como meta en común cambiar el modelo obsoleto de ciudad tradicional en Smart City, enfocándose en mejorar la gestión de los siguientes sectores [16]:

- Generación y suministro de energía
- Medio ambiente

- Gobierno
- Movilidad
- Construcción

Desde la perspectiva del medio ambiente se la podría definir como aquella ciudad que utiliza las Tecnologías de la información y comunicación (TIC) como instrumento y herramienta para mejorar la calidad de vida de la población, persiguiendo un equilibrio entre el medio ambiente y el consumo de los recursos naturales [16].

Para que una ciudad tradicional se considere una Smart City debe agrupar seis características, las cuales se muestran en la Figura 2.1.



Figura 2.1: Características de una Smart City

Las seis características expuestas en la Figura 2.1 definen como es el comportamiento y crecimiento de una ciudad hacia el concepto de Smart City.

2.1.3. Smart Environment

Smart Environment se enfoca en el uso de la Green TI (Green Computing and Information Technology) para el desarrollo de un entorno inteligente que permita optimizar los recursos naturales, protegiendo y conservando el medio ambiente, controlando y racionalizando el consumo de energía, disminuyendo los gases, residuos y a su vez mitigando los efectos negativos que estos generan hacia el planeta tierra. Principalmente la Green TI se caracteriza por el desarrollo de productos ecológicos que promueven el reciclaje y la sostenibilidad computacional, reduciendo así el impacto medio ambiental e incrementando la viabilidad económica. Al crear un entorno inteligente, se está proporcionando un sistema capaz tomar decisiones autónomas con el objetivo de la optimización, eficiencia y sostenibilidad medioambiental [17].

Smart Environment se enfoca en los siguientes ámbitos a los cuales se los puede dotar de inteligencia mediante soluciones TI (ver Tabla 1):

SMART ENVIRONMENT
<p>Energía (Smart Grid): consumo y eficiencia energética</p> <p>Agua (Smart Water): control, gestión y optimización del agua.</p> <p>Residuos (Smart Waste): control y sensorización de contenedores. Monitorización de flotas encargadas de la recolección de residuos.</p> <p>Medio Ambiente (Smart Green): monitorización de la polución, el ruido, el medio natural y perceptual, eco-edificios sostenibles.</p>

Tabla 1: Indicadores de Smart Environment

2.2. Introducción a las Redes de Sensores Inalámbricos

A lo largo de los últimos años, hemos sido testigos del vertiginoso avance de las tecnologías inalámbricas. En particular una de las tecnologías más prometedoras a futuro dado su rápido desarrollo y múltiples aplicaciones son las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network) consideradas pilar fundamental para el desarrollo de las Smart Cities [11].

Actualmente analistas en el área de tecnologías inalámbricas, señalan que la importancia de las redes de sensores inalámbricos (WSN) radica en que se constituyen en un potente campo de investigación gracias a las disímiles áreas donde pueden ser empleadas tales como seguridad, monitorización del medio ambiente, industria, agricultura etc [18].

2.2.1. Definición, Arquitectura y Características de WSN

El concepto de redes de sensores inalámbricos (WSN) se fundamenta en una serie de dispositivos electrónicos con acceso al mundo exterior mediante el uso de sensores [19]. Estos dispositivos dado su pequeño tamaño y su habilidad de situarse en cualquier lugar se denominan “mote”. Los “motes” son capaces de comunicarse entre sí creando redes malladas (mesh networks) usando el protocolo ZigBee para luego retransmitir la información almacenada hasta un punto de control [19]. En otras palabras, las redes de sensores inalámbricos (WSN) están formadas por sensores autónomos, desplegados espacialmente, con dispositivos capaces de establecer una comunicación entre sí, con un bajo consumo de energía y retransmitiendo los diferentes datos recolectados [20].

Por otro lado, podemos apreciar los elementos que conforman una red WSN está formada por sensores (motes), puerta de enlace (Gateway) y estación base, tal como se puede apreciar en la Figura 2.2.

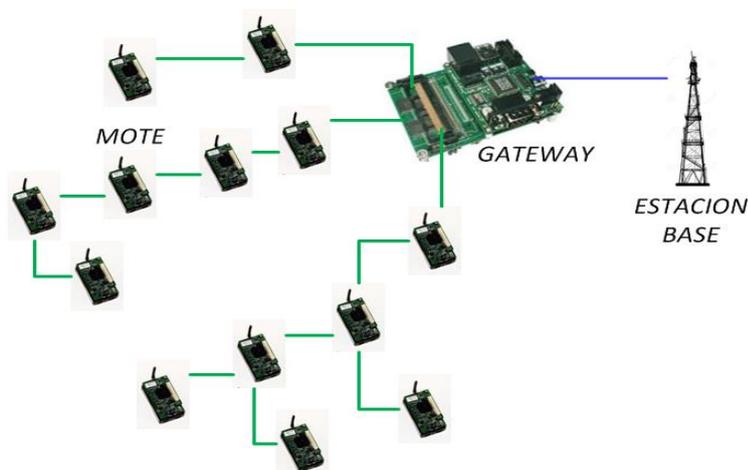


Figura 2.2: Elementos de una Red WSN

- Sensores: Convierten en señales eléctricas la información tomada del medio.
- Nodos de sensor: Los datos tomados por el sensor son captados por estos nodos a través de sus puertas de datos y la envía a la estación base.
- Gateway: Elementos que interconectan la red de sensores y una red TCP/IP.
- Estación base: Recoleta datos.
- Red inalámbrica: Basada en el estándar 802.15.4 ZigBee.

2.2.2. Características de las WSN:

- Baja capacidad de procesamiento de datos, poco consumo de energía y bajo costo [21].
- Integración con otras tecnologías como: minería, medicina, agricultura, biología etc.
- Permite la interacción del ser humano con el medio.
- Facilidad de instalación.
- Precisión y frecuencia de las mediciones [22].

- Facilidad de despliegue y auto configurables, ya que los nodos pueden desempeñarse tanto como emisores y receptores, adicionalmente estos permiten establecer enlaces, sin la necesidad de línea de vista [21].
- Flexibilidad, robustez y seguridad.

2.2.3. Ventajas y Desventajas

2.2.3.1. Ventajas

En la Figura 2.3 se describen las ventajas que presentan las redes WSN [23].

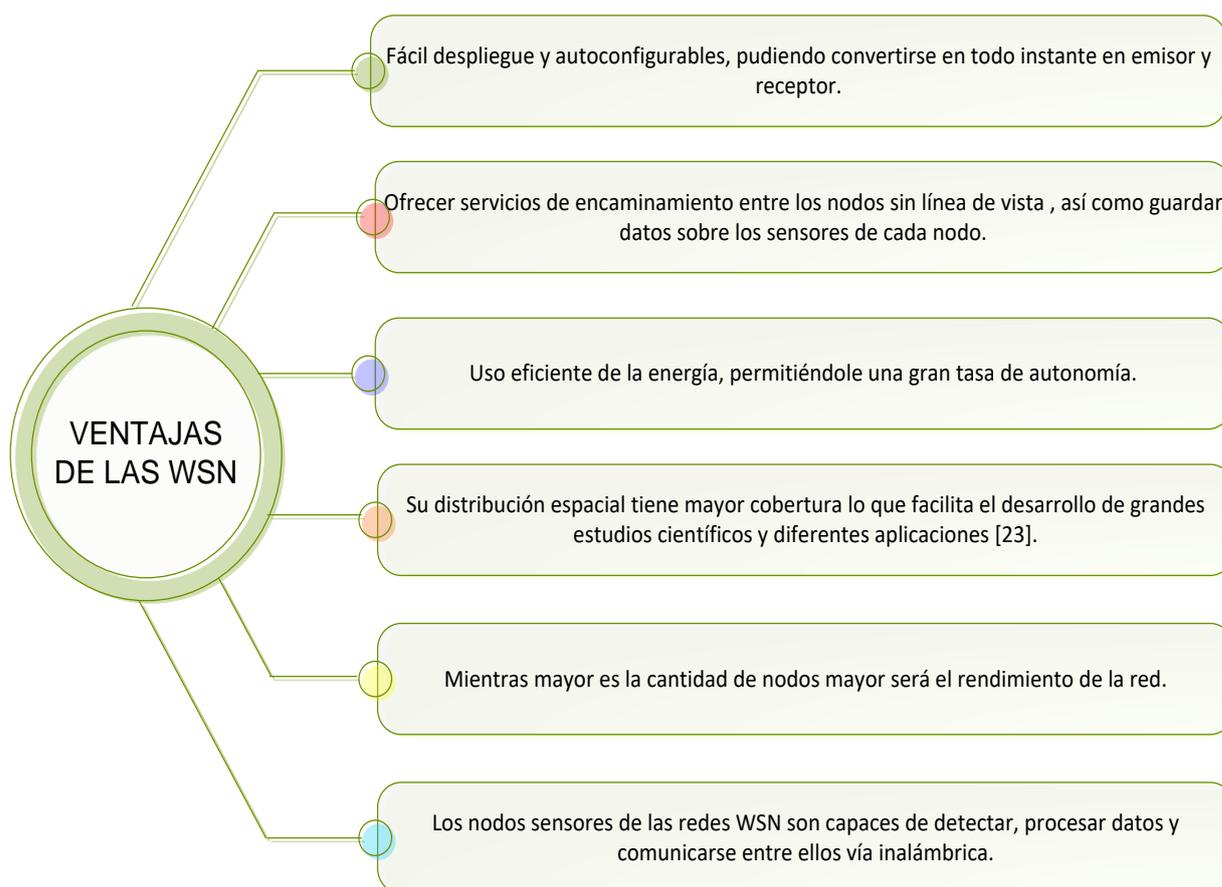


Figura 2.3: Ventajas de las WSN.

2.2.3.2. Desventajas

En la Figura 2.4 se describen las desventajas que presentan las redes WSN [23].

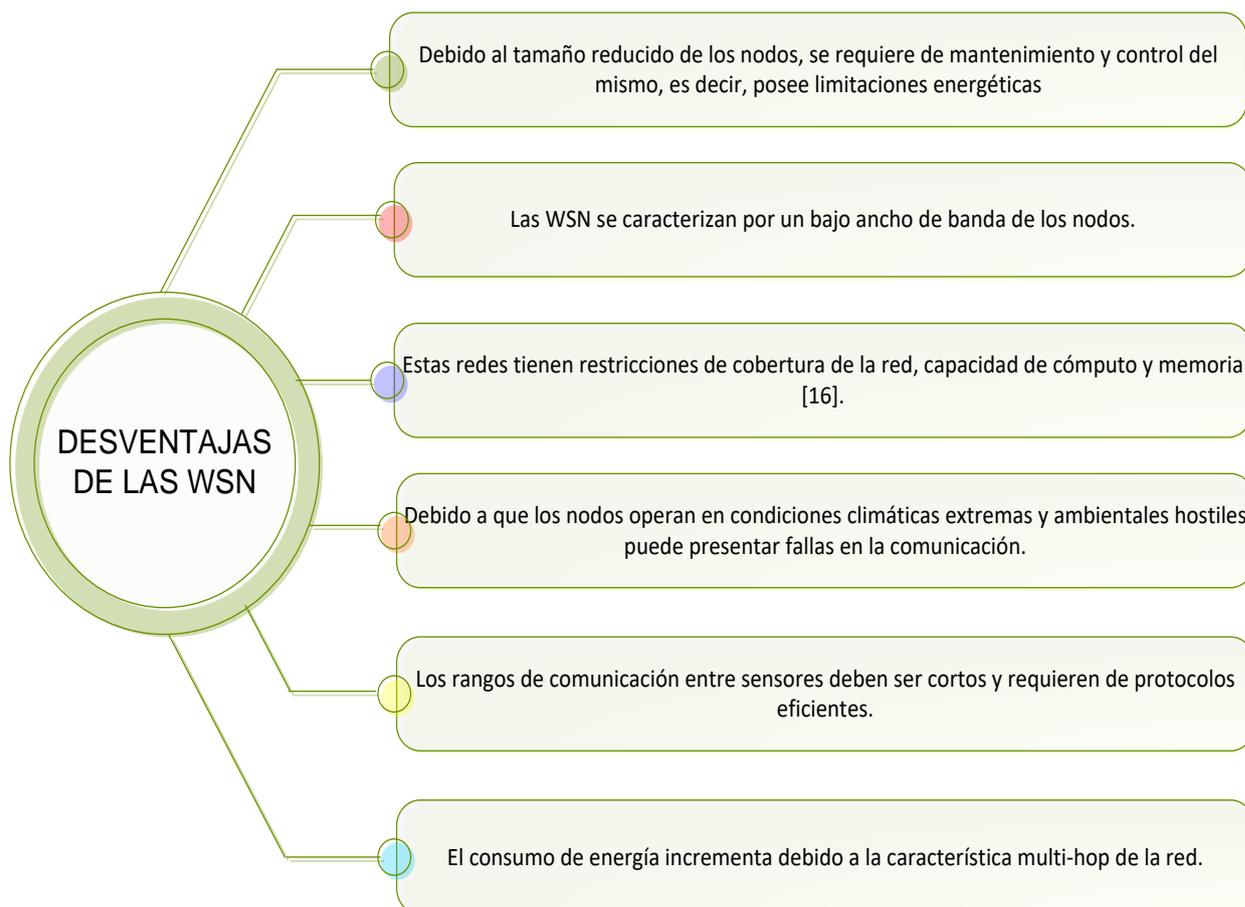


Figura 2.4: Desventajas de las WSN.

2.3. Tecnologías y Estándares Inalámbricos

Actualmente las redes WSN están basadas en los estándares inalámbricos más conocidos como el IEEE 802.11b para redes LAN, para redes PAN, el estándar 802.15.1 (Bluetooth IEEE, 2002) y IEEE 802.15.4 (ZigBee IEEE, 2003) [20].

Las principales características de estas tres tecnologías se describen a continuación en la Tabla 2.

Comparación entre tecnologías inalámbricas Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee			
	WiFi	Bluetooth	ZigBee
Standard	(IEEE 802.11a, b, g)	(IEEE 802.15.1)	(IEEE 802.15.4)
Radio	DSSS, (direct sequence spread spectrum)	FHSS, (frequency hopping spread spectrum)	DSSS, (direct sequence spread spectrum)
Frequency	2.4 GHz, 5.8GHz	2.4 GHz	868/915 MHz, 2.4 GHz
Topology	Star	Star	Mesh, Star, tree
Data Rate	11-105 Mbps	1 Mbps	250 Kbps
N° de nodos por master	32	7	64000
Latencia	Up to 3 s	Up to 10 s	30 ms
Tipo de datos	Video, audio, gráficos, películas, ficheros	Audio, gráficos, películas, ficheros	Pequeños paquetes de datos
Alcance (metros)	100	10 (v1.1)	60 -100
Expansión	Roaming	no	si
Duración Batería	12 y 48 horas	1 semana	100 -1000 días
Complejidad	Complejo	Muy complejo	Sencillo
Aplicación Principal	WLAN	WPAN	Control
Memoria necesaria	1MB +	250 KB+	4 KB - 32 KB
Importantes	flexibilidad	aplicación	costo y bajo consumo

Tabla 2: Comparación entre tecnologías inalámbricas

Tomando en referencia la Tabla 2, podemos concluir que todos los protocolos antes mencionados son adecuados para ser usados en redes WSN. Sin embargo, a pesar que todos son similares podemos encontrar algunas diferencias que hacen que el estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee IEEE, 2003) sea el más adecuado para el diseño e implementación de redes WSN.

2.3.1. Estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee IEEE, 2003)

El estándar IEEE 802.15.4 en la actualidad es la norma que regula las WSN y es el empleado en éstas.

Este estándar define las comunicaciones en las capas físicas y de control de acceso al medio-MAC (siguiendo el modelo OSI, capas uno y dos) en las redes de sensores inalámbricos de área personal y de baja velocidad (Low Rate-Wireless Personal Area Networks) [24].

Una LR-WPAN es una red de comunicación simple, de bajo costo que permite la conectividad inalámbrica en aplicaciones con potencia limitada y requisitos de rendimiento relajado. Los principales objetivos de un LR - WPAN son la facilidad de la instalación, la transferencia de datos fiable, la operación de corto alcance, costo extremadamente bajo, y una duración de batería razonable, manteniendo al mismo tiempo un protocolo simple y flexible [24].

En la Tabla 3 se detallan las características más elementales de una LR-WPAN:

Características de una LR-WPAN
Tienen velocidades de datos en el orden de los 250 kb/s, 40 kb/s, y 20 kb/s
Sus dispositivos pueden ajustarse a una topología estrella o punto a punto.
Asignación de intervalos de tiempo garantizados (ETG)
Bajo consumo de energía
Indicación de la calidad del enlace (ICT)
16 canales en la banda de 2.450 GHz, 10 canales en la banda de 915 MHz y 1 canal en la banda 868 MHz.

Tabla 3: Características de una LR - WPAN

En una red LR – WPAN se pueden identificar dos tipos de dispositivos:

- El primero es un dispositivo de función completa denominado FDD el cuál puede funcionar en tres modos como: un coordinador de la red de área personal (PAN), un coordinador o un dispositivo. Además, un FFD puede hablar con otros RFD u otros FDD.
- Mientras que un RFD es un dispositivo de función reducida y está diseñado para aplicaciones que son extremadamente simples.

2.3.2. Arquitectura de una LR-WPAN

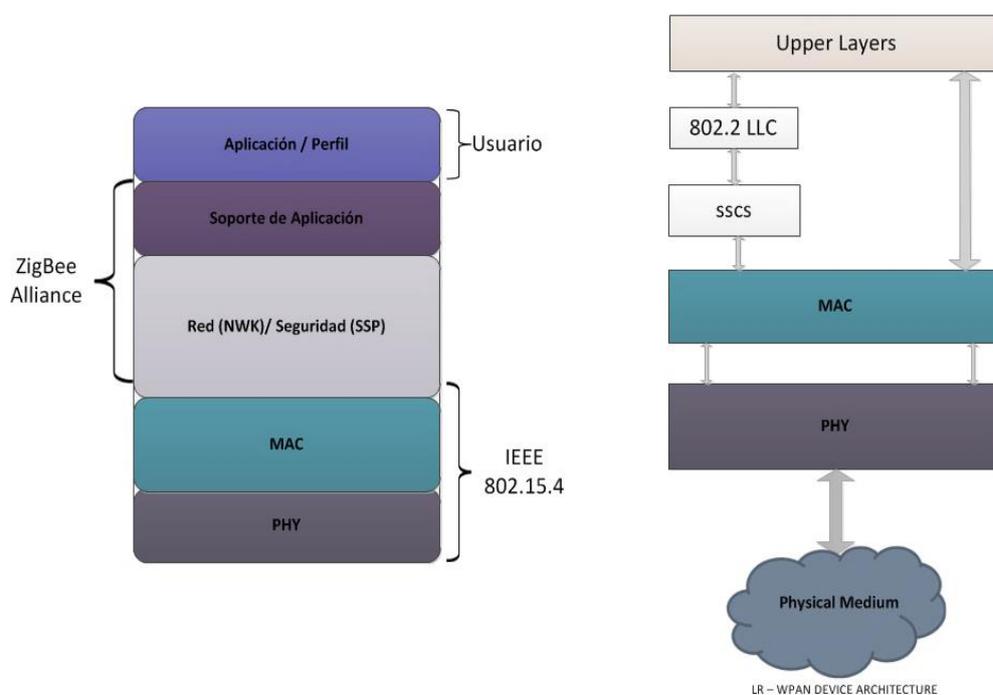


Figura 2.5: Arquitectura de una red LR – WPAN

La arquitectura de una red LR-WPAN se define en términos de un número de bloques con el fin de simplificar el estándar. Estos bloques son llamados capas. Cada capa es responsable de una parte de los servicios estándar y ofrece a las capas superiores.

La disposición de los bloques se basa en la interconexión de sistemas abiertos (OSI) de siete capas [24]. Las interfaces entre las capas sirven para definir los enlaces lógicos que se describen en esta norma.

Un dispositivo de LR-WPAN comprende un PHY, que contiene el transceptor de radiofrecuencia (RF), junto con su mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa MAC que proporciona acceso al canal físico de todos los tipos de transferencia. La Figura 2.5 muestra estos bloques en una representación gráfica [24].

2.3.3. Capa Física (PHY)

La capa PHY provee dos servicios: el servicio de datos PHY y el servicio de gestión de interfaz PHY a la entidad de gestión de capa física (PLME).

El servicio de datos PHY permite la transmisión y recepción de unidades de datos de protocolo PHY (PPDU) a través del canal de radio físico.

Las características de la capa física PHY son de activación y desactivación en el transceptor de radio, ED, de ICT, selección de canal, la evaluación de canal libre (CCA), y la transmisión, así como la recepción de paquetes a través del medio físico.

Por otro lado, en la capa PHY, se definen tres bandas de frecuencia de funcionamiento con 27 canales de radio [25].

Estas bandas son ISM (Instrumentation, Scientific and Medical Radio bands), 902-928 MHz (EEUU), 868-870 (Europa), 433.05-434.79 MHz (EEUU y Europa) y 314-316 MHz (Japón) y la banda de GHz de 2.400-2.4835 GHz (universalmente aceptada) [25]. La disposición de los canales se muestra en la Figura 2.6.

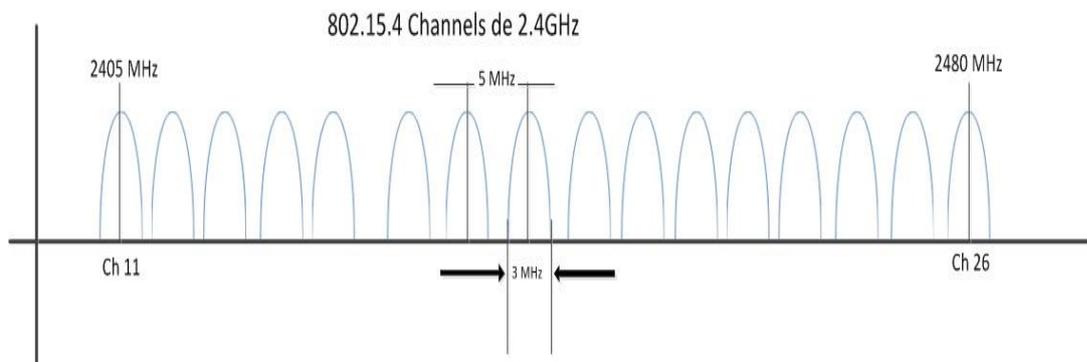


Figura 2.6: Disposición de los canales en la Banda de 2.4GHz

2.3.4. ZigBee

En el estándar IEEE 802.15.4 existe un lenguaje inalámbrico que los dispositivos usan para conectarse entre sí denominado ZigBee, basado en el estándar IEEE 802.15.4 [25]. ZigBee es una nueva tecnología originaria de la antigua alianza HomeRF inalámbrica de corto alcance y bajo consumo.

2.3.4.1. Tipos de Dispositivos de ZigBee

El ZigBee es una mezcla de tres componentes básico tales como: ZigBee coordinador, ZigBee router y un dispositivo final ZigBee, de esto depende la estructura topológica:

ZigBee coordinador: Es el responsable de la red, el encargado de asignar intervalos de tiempo a otros dispositivos. Este se puede conectar directamente con dispositivos finales o router ZigBee o con ambos a la vez.

ZigBee router: Es el encargado de retransmitir los mensajes entre dispositivo y mantener rutas de respaldo. En casa de fallo el router recupera la ruta. Proporciona la interfaz entre el coordinador y los dispositivos finales.

Dispositivos finales ZigBee

Trabaja como fuente y sumidero para mensajes, en su mayoría se queda en modo de esperar y ahorra batería. Puede comunicarse con otros dispositivos en modo activo.

2.3.4.2. Topología de la Red ZigBee

En una red ZigBee puede haber hasta 254 nodos. Entre las topologías de red tenemos: topología en estrella, topología en árbol y en malla. Estas topologías pueden combinarse formando múltiples topologías híbridas.

Topología en estrella

Esta topología puede soportar hasta 6000 dispositivos. Como se muestra en la Figura 2.7, el coordinador ZigBee es el dispositivo central en esta topología y este se enlaza con los dispositivos finales ZigBee. Una de las desventajas de esta topología, es que si existe algún fallo en el coordinador entonces toda la red falla.

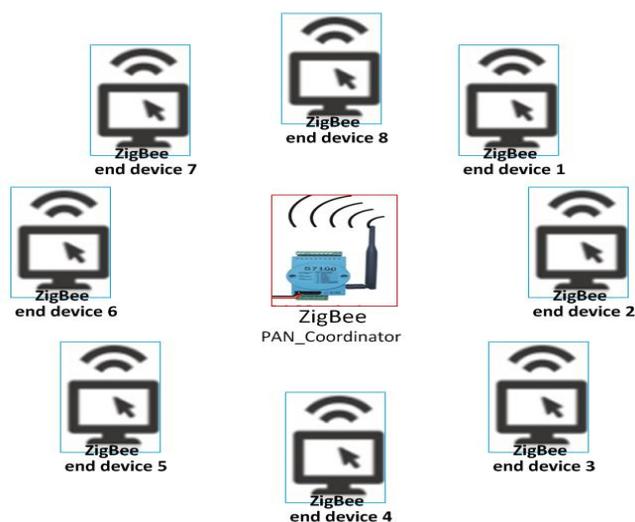


Figura 2.7: Topología estrella

Topología en árbol

En esta topología el coordinador ZigBee se posiciona en la raíz de la red, como se aprecia en la Figura 2.8 solo el coordinador y el router pueden actuar como nodo padre y los dispositivos finales se pueden conectar a los routers como nodos hijos ya que estos no son capaces de retransmitir mensajes.

Si un nodo quiere transmitir un mensaje a otro nodo, este envía un mensaje a su nodo padre que es un nivel más alto que este, entonces el mensaje es retransmitido hasta que llegue a su destino.

Es importante mencionar que, para esta topología, si algún router falla entonces los dispositivos finales dejan de trabajar.

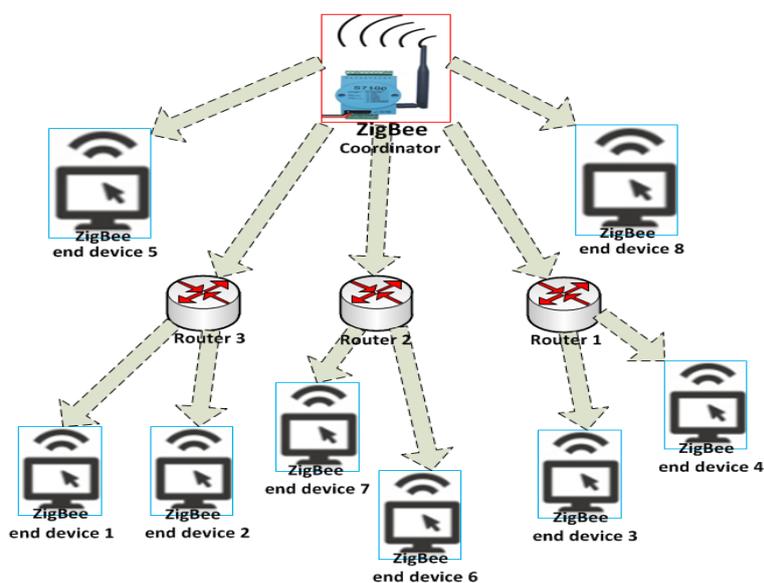


Figura 2.8: Topología árbol

Málaga (España). - El proyecto para hacer de Málaga una Smart City está centrado en la gestión de la energía. Se ha optado por la integración de fuentes renovables en la red eléctrica, con el objetivo de aumentar la eficiencia y reducir las emisiones de dióxido de carbono. La intención es que el control energético llegue a los hogares también [12].

Búzios (Brasil).- En el proyecto de Búzios se está realizando la conversión de la red de distribución en una red más inteligente, con medidores digitales y una automatización capaz de integrar toda la generación existente, las nuevas energías renovables y los vehículos eléctricos [12].

Santiago de Chile (Chile). - En Santiago de Chile se está desplegando el proyecto en el distrito Ciudad Empresarial de Santiago. Allí se va a probar la integración de tecnologías como el Smart metering, la automatización de la red, los vehículos eléctricos, la iluminación pública y la generación distribuida, evaluando sus aspectos económicos, técnicos y sociales [17].

CAPÍTULO 3

3. MODELAMIENTO, METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO.

En el capítulo anterior se describió el brevemente el concepto de Smart Cities, su clasificación y las diferentes ciudades que están empleando este nuevo concepto. Adicionalmente se explicó sobre la clasificación de las redes WSN, sus topologías, estándares de comunicación que usan, sus ventajas y desventajas.

En el presente capítulo se describirán las características y especificaciones principales en cuanto a hardware y software que se emplearán en el presente proyecto y adicionalmente la metodología para la resolución del problema.

3.1. Descripción del Escenario

Acorde con los lineamientos del proyecto, como punto de partida, se realizó una zona de búsqueda para identificar posibles puntos donde se desplegarán los nodos y a su vez una identificación del ambiente donde se desarrollará los radio enlaces.

Como resultado de la búsqueda se pudo identificar el escenario, el cual se encuentra en un entorno de leve follaje, con plantas y arbustos de baja altura. Adicionalmente, se observó en las cercanías, estructuras de concreto a modelo de casetas (ver Figura 3.1). Se tomaron varios puntos pendientes de validación en las zonas consideradas de mayor importancia, es decir se tomó en consideración sectores con mayor concentración de personas como canchas deportivas, zonas de descanso y sectores cercanos a la carretera. Es importante mencionar que se verificó de manera visual la existencia de LOS (línea de vista) entre pares de puntos en donde se espera colocar los dispositivos, posteriormente se realizará la verificación de LOS y zonas Fresnel^a con las coordenadas definitivas.

^a Zona Fresnel: volumen de espacio existente entre el emisor y receptor, cuyo desfase de onda electromagnética no supera los 180 grados.



Figura 3.1: Parque / escenario semiurbano

Se dio mucha atención a la influencia del follaje en la pérdida de propagación, dispersión y efecto multipaso, causado por uno o varios árboles dentro del radio de propagación, debido a que estos entornos afectan directamente y de manera significativa a la calidad de servicio (QoS)^b en las comunicaciones inalámbricas. [26].

Para el segmento de espectro en estudio perteneciente a las bandas ISM o bandas libres, se tiene un ancho de banda de 3 MHz por canal y un total de 16 canales que van del 11 al 26, destinados para la transmisión de datos, cada uno con una separación de 5MHz entre ellos, como se observa en la Figura 3.2.

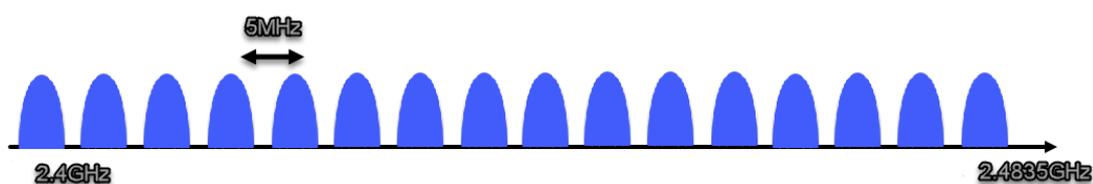


Figura 3.2: Estructura de canales IEEE 802.15.4

^b QoS: Calidad de Servicio o Quality of Service en sus siglas en inglés, es el desempeño de una red alámbrica o inalámbrica, apreciado desde la perspectiva del usuario final.

De la misma forma y adicional a lo antes descrito, se puede evidenciar pocas redes inalámbricas dentro la banda de 2.4GHz coexistiendo en el escenario, es decir que la banda en análisis no se encontraba saturada.

Luego de la identificación del entorno y de las diferentes variables que podrían afectar el enlace propuesto, se procederá con la metodología correspondiente para el diseño del sistema en estudio.

3.2. Descripción de la metodología

En esta sección, se detallará secuencialmente el proceso que permitió realizar el diseño de la red WSN (ver Figura 3.3).



Figura 3.3: Diagrama de Bloques – Metodología

Luego de identificar el escenario descrito en el inciso anterior, se determinó la posición geográfica de varios puntos en zonas con gran concentración de personas como canchas deportivas, áreas de esparcimientos, etc. Esto fue posible gracias al uso de un GPS^c del fabricante Garmin.

^c GPS: Sistema de posicionamiento global que permite determinar la posición de una persona, un objeto, un vehículo con una precisión en el orden de los centímetros.

Posteriormente, para realizar el diseño de la mota se consultó con profesionales en el campo del medio ambiente, específicamente con expertos en problemas ambientales, con la finalidad de identificar los parámetros atmosféricos a ser censados por ejemplo para gases tóxicos: dióxido de azufre, monóxido de carbono, metano, etc. Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta al momento de diseñar la mota es su compatibilidad con los distintos tipos de sensores que actualmente existen. Por lo cual, dada las especificaciones antes mencionadas la mota que se va a seleccionar, debe caracterizarse por su versatilidad para poder conectarse con cualquier tipo de sensores, así como el uso de varias tecnologías de radio por ejemplo ZigBee.

Por otro lado, para analizar el comportamiento de las señales que se transmiten entre los nodos la red WSN y predecir las pérdidas de propagación que se tiene sobre el terreno constituido por vegetación, edificios, entre otros, se utilizó el Modelo empírico de Weissberger que permite hallar las pérdidas por follaje, cobertura de la señal, potencia recibida y pérdidas que se tiene en el enlace de radio. A partir de esta información se podrá determinar el respectivo presupuesto de enlace, la relación señal/ruido (Signal to noise ratio SNR o S/N), la capacidad de canal, entre otros, que garanticen la confiabilidad de la red WSN a diseñar.

Basados en la información obtenida previamente como: las coordenadas de los puntos, las pérdidas por propagación dentro del escenario y las características de capa física de la mota (potencia de transmisión (PTX), potencia de recepción (PRX), ganancia de la antena de transmisión (GTX), ganancia de la antena de recepción (GTX), ruido (PNOISE) y banda de frecuencia), se procederá a desarrollar el código fuente y consecuentemente a realizar la simulación del diseño de la red WSN usando el software matemático Matlab.

Esta herramienta matemática nos proporciona una interfaz gráfica la cual permite la visualización del despliegue e interconexión entre los nodos finales y coordinadores para diferentes escenarios, esto permite definir la calidad del radioenlace entre los nodos y coordinadores, y simultáneamente poder identificar el tipo de topología a usar.

De ésta manera, para el diseño de la red WSN se usará una topología tipo peer to peer, ya que esta topología ofrece una red descentralizada, sin la dependencia de un nodo central.

Finalmente, toda la información adquirida por la red WSN será transmitida a través de un Gateway el cual proveerá conectividad inalámbrica hasta una estación base.

3.2.1. Descripción del Algoritmo

Para poder conocer las condiciones de los diferentes enlaces que se establecen en la red funcionando en la banda de 2.4GHz, se definirá primero del total de 16 canales que ofrece dicha banda de frecuencia operando bajo el estándar 802.15.4, el canal en el cual se va a trabajar.

Luego con la ayuda del software MATLAB en el editor de código generamos las posiciones de los nodos mediante una matriz de posiciones, para esto debemos transformar los puntos adquiridos con el GPS de coordenadas geográficas a coordenadas UTMd, para poder obtener, mediante proyecciones de puntos, un sistema de coordenadas cartesianas.

Como siguiente paso, definimos las diferentes variables sobre los dispositivos que se van a emplear como: Potencia de transmisión, ganancia de transmisor y receptor, frecuencia de operación y el Pnoise característico del entorno de análisis. Este último representa el ruido o perturbación causado por las interferencias de las señales externas coexistiendo en la misma frecuencia o en canales adyacentes.

Luego mediante dos lazos for anidados, se procederá a recorrer el arreglo de posiciones previamente defino, para determinar las distancias que

^d UTM: Sistema gráfico que permite relacionar los puntos de la superficie curva de la Tierra con los de una superficie plana, identificados por las coordenadas cartesianas.

existen entre cada uno de los puntos. Para esto se usará la fórmula de la distancia entre dos puntos:

$$d(\mathbf{p1}(x, y, z), \mathbf{p2}(x, y, z)) = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (1)$$

Para la determinación de la capacidad máxima del canal se hará uso de la fórmula de Capacidad de Shannon para canales con ruido, la cual definirá la característica del canal, más no el método de transmisión.

Finalmente, basándonos en la matriz resultante sobre la relación señal a ruido o SNRe, se procederá a graficar los enlaces existentes entre los diferentes nodos, con una codificación de colores que representarán la capacidad máxima del canal presente en dicho enlace:

La descripción del algoritmo descrito anteriormente se lo puede apreciar en el diagrama de flujo que se muestra a continuación (ver Figura 3.4).

° SNR: Relación señal a ruido, es la proporción entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia de ruido que interfiere.

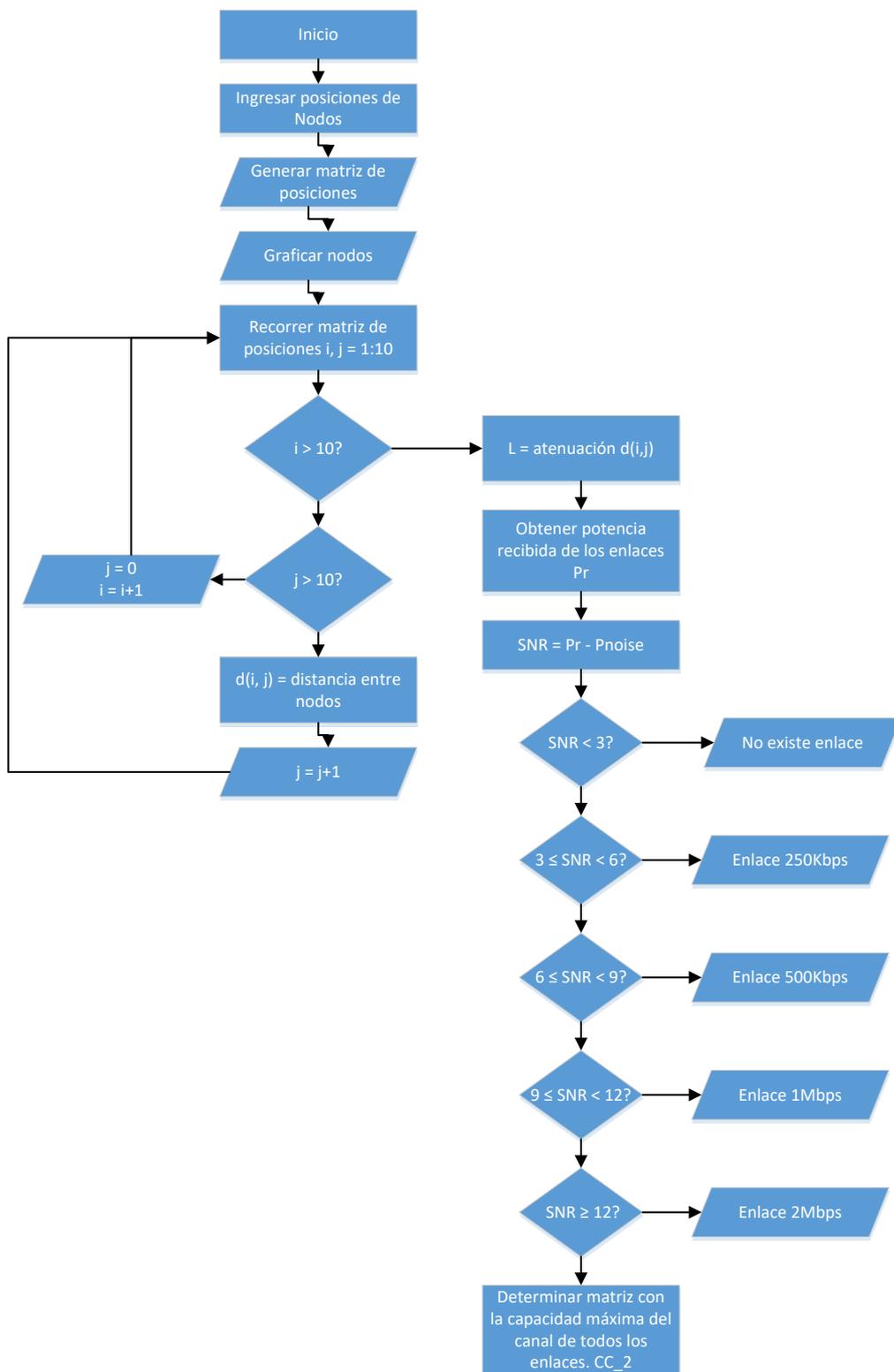


Figura 3.4: Diagrama de Flujo del Algoritmo utilizado.

3.3. Modelamiento de Datos

Sobre la base de lo expuesto en el inciso anterior, como primer paso para la determinación de la frecuencia central del canal que va a ser utilizada en este estudio se dispone de la siguiente ecuación:

$$F_c = 2405 + 5(k - 11) \text{ [MHz]} \text{ para } k = 11, 12, 13, \dots, 26 \quad (2)$$

En donde k representa el número del canal de interés.

Dado que el entorno en donde se desarrolla nuestro estudio es propenso a tener otras redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencia, la re-selección de canales dentro de la misma banda es un factor muy importante para garantizar el éxito en el enlace. [27]

Como siguiente paso para efectos del cálculo de las diferentes atenuaciones que afectan a nuestra señal, se plantea utilizar el modelo de vegetación de Weissberger, el cual se ajusta de manera efectiva al entorno de análisis, y este nos permitirá estimar una pérdida adicional a la del espacio libre debida a la atenuación del follaje a través del camino de línea de vista.

Este modelo basado en una función de decaimiento exponencial, es indicado para frecuencias entre los 230 MHz y 95 GHz y está dado por la siguiente ecuación:

$$L(\text{dB}) = \begin{cases} 1.33F^{0.284}df^{0.588}, & 14 < df \leq 400 \text{ m} \\ 0.45F^{0.284}df, & 0 < df \leq 14 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

En donde df representa la profundidad del follaje a lo largo de la línea de vista expresado en metros, y F la frecuencia en GHz. [28]

Dadas las condiciones que anteceden, se tomará en consideración la atenuación en el espacio libre para enlaces punto a punto entre antenas isotrópicas, usando

la recomendación ITU para la pérdida básica de transmisión en el espacio libre, cuya ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

En donde L_{bf} es la pérdida de transmisión en el espacio libre, d es la distancia y λ la longitud de onda. [29]

Una vez establecido los modelos de propagación, se procederá a la obtención de la potencia recibida en cada uno de los receptores, cálculo que posteriormente dará paso a la obtención del SNR.

La potencia de recepción medida en cada receptor se rige bajo la siguiente ecuación:

$$Pr = Ptx + Gtx + Grx + L \quad (5)$$

Dónde:

Ptx = Potencia dada por el transmisor.

Gtx = Ganancia de la antena transmisora.

Grx = Ganancia de la antena receptora.

L = Total de atenuaciones.

Para la obtención de la relación señal a ruido o SNR, se empleará la siguiente ecuación:

$$SNR = Pr - Pnoise \quad (6)$$

Luego se realizará el cálculo de la capacidad máxima del canal, para ello se hará uso de la fórmula de Capacidad de Shannon para canales con ruido, descrita por la siguiente ecuación:

$$CC = BW * \log_2(1 + SINR) \quad (7)$$

En donde BW representa el ancho de banda efectivo del canal, y $SINR$ es la proporción señal a ruido más señales interferentes.

Adicionalmente se determinará la relación señal a ruido o SNR en cada uno de los enlaces existentes, de manera que, mediante una tabla de relaciones, se pueda estimar la tasa de transmisión de datos presente en dicho enlace.

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO DE LA RED Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Localización geográfica del escenario.

Para nuestro estudio, el escenario se encuentra ubicado en un área abierta que homologa a un modelo semiurbano.

Como se lo mencionó en incisos anteriores, se dispone de 10 nodos distribuidos a lo largo de toda el área de análisis, de los cuales se describe la siguiente tabla de posicionamiento (ver Tabla 4):

Node	Cluster #	Longitud	Latitud	Tx Power	Propagation Model
Node 1 Cluster 1	1	-79.9085611	-2.1053861	100 mW	OUTDOOR
Node 2 Cluster 1	1	-79.9086389	-2.1047722	100 mW	OUTDOOR
Cluster 1 Coordinator	1	-79.9083139	-2.1050694	100 mW	OUTDOOR
Node 1 Cluster 2	2	-79.9082111	-2.1029417	100 mW	OUTDOOR
Node 2 Cluster 2	2	-79.9079028	-2.1034556	100 mW	OUTDOOR
Cluster 2 Coordinator	2	-79.9078083	-2.1030556	100 mW	OUTDOOR
Node 1 Cluster 3	3	-79.9060611	-2.10311111	100 mW	OUTDOOR
Cluster 3 Coordinator	3	-79.906475	-2.10356944	100 mW	OUTDOOR
PAN Coordinator 1	-	-79.9078667	-2.1044222	100 mW	OUTDOOR
PAN Coordinator 2	-	-79.9073611	-2.1037278	100 mW	OUTDOOR

Tabla 4: Tabla de Ingeniería de los Nodos.

Es importante mencionar que los puntos para la localización de los nodos se los obtuvieron asegurando línea de vista, y una zona Fresnel libre de obstrucciones en cada uno de los enlaces de nuestro sistema de comunicación.

Las coordenadas fueron tomadas con la ayuda del dispositivo GPSmap62 del fabricante Garmin, luego exportadas al programa "Google Maps" para una mejor visualización de toda el área, como se observa en la Figura 4.1.



Figura 4.1: Captura del Parque Samanes obtenida por “Google Maps”.

Como se evidencia en la Figura 4.1, se disponen de 3 clusters, encabezados por dispositivos FFD o clusters Head (marcados en azul claro), de los cuales se conectan los nodos terminales, quienes integrarán los sensores (marcados en rojo), distribuidos de la siguiente manera:

Nodo 1 Clúster 1: Sensor de Temperatura + Sensor de Ruido.

Nodo 2 Clúster 1: Sensor de Gases.

Nodo 1 Clúster 2: Sensor de Gases + Sensor de Ruido.

Nodo 2 Clúster 2: Sensor de Incidencia de rayos UV.

Nodo 1 Clúster 3: Sensor de Temperatura + Sensor de Incidencia de Rayos UV.

4.2. Diseño estructural de la red

Para el escenario antes descrito, se plantea utilizar una red con topología peer to peer como se observa en la Figura 4.2, la cual se ha considerado la más conveniente para ser implementada en esta red WSN, debido a que permite la formación de redes más complejas eliminando la dependencia de un nodo central, de manera que, si un nodo falla, no se verá afectada toda la red. En esta topología cada dispositivo es capaz de comunicarse con cualquier otro que se encuentre dentro de su radio de cobertura.

Un tipo de comunicación peer to peer es la división por clúster, en donde cada uno integra un dispositivo coordinador como CLH (Clúster Head) y de él se conectarán las ramas conformadas por dispositivos finales o RFD. Cada clúster será identificado por un CID (Clúster ID), el cual es único, asignado de manera progresiva y asociado al dispositivo que produce flujo de datos.

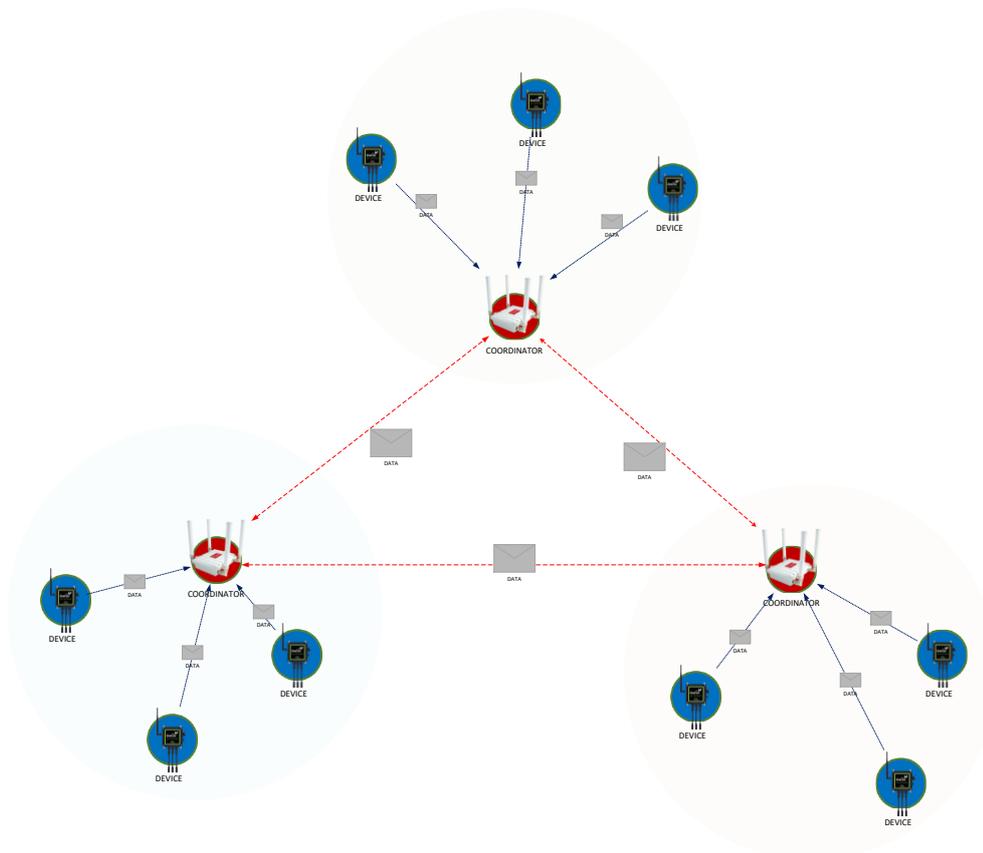


Figura 4.2: Topología de la red.

Con referencia a la Figura 4.2, se puede observar que los dispositivos coordinadores son los encargados de establecer el enlace entre clusters, es decir que estos dispositivos recopilarán toda la información obtenida de los diferentes nodos finales desplegados en el clúster y la procesarán para futuras acciones.

El fin principal de utilizar esta tecnología se atribuye a su baja velocidad de transmisión y bajo ciclo de servicio con un rango de 0.1% a 1%, permitiendo así

que el CSMA tenga resultados robustos [30]. Adicionalmente a lo antes mencionado es su bajo consumo energético; de hecho, se ha probado que dispositivos alimentados con baterías AA, pueden durar hasta casi dos años, siendo ese su única fuente de alimentación, esto se debe a los diferentes estados de operación que se integran en el protocolo, como por ejemplo en modo latente, es decir en modo sleep, en donde el dispositivo permanece inactivo hasta recibir su próxima instrucción, disminuyendo de manera significativa su consumo energético. [27]

Sobre la base de las consideraciones antes descritas, se determinó el uso de 10 motas, entre ellas dispositivos coordinadores y dispositivos RFD, distribuidas a lo largo de toda el área de análisis.

4.3. Criterios de Selección de las motas

El fabricante Libellium posee una gran variedad de módulos para diferentes aplicaciones en el área de: agricultura, ciudades inteligentes, medición de agentes contaminantes, etc. Todos los módulos integran estándares o protocolos de comunicación inalámbrica como: WIFI, Bluetooth, GPRS ZigBee, etc, de manera que todos estos factores mencionados hacen de los equipos de Libellium una excelente opción para el diseño de una red de sensores. [31]

Con la base de todo lo descrito, se plantea realizar el diseño del conjunto sensor y transmisor que más se ajuste a los requerimientos que se tienen, por lo tanto, en este estudio se decidió utilizar el modelo “Wasp mote” del fabricante Libellium por las razones mencionadas a continuación:

Permite fácil despliegue debido a su pequeño tamaño y no necesita de accesorios adicionales para su instalación, siguiendo el modelo plug and sense.

Bajo consumo energético y gran autonomía, debido a que integra dos paneles solares, uno externo de fácil movilidad y otro interno.

Se ajusta a los requerimientos que se tienen en cuanto a frecuencia, cobertura, tasa de transmisión, usando el protocolo IEEE 802.15.4.

Cubierta IP65 que lo hace resistente al polvo y al agua, siendo de esta manera ideal para su uso en zonas abiertas y expuestas a las diversas condiciones climáticas. [31]

El modelo “Waspnote” de Libelium, en su interior se encuentra constituido por dos placas las cuales integran la tarjeta programable, encargada del procesamiento de datos, recepción de la información captada por los sensores, comunicación con otros dispositivos mediante sus puertos seriales, entre otros, y un módulo transceptor, encargado de la comunicación inalámbrica con los diferentes nodos que se integren en la red. Para el dispositivo programable integrado en el empaquetado, se tiene el módulo “Arduino Mega 1281”, cuyas características técnicas se mencionan en la siguiente tabla (ver Tabla 5).

Características Generales	
Microcontrolador	AT mega1281
Frecuencia de Operación	14.4756 MHz
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
SD Card	2GB
Peso	20gr
Dimensiones	73.5mm x 51 x 13mm
Consumo	
ON	15mA
Sleep	55uA
Deep Sleep	55uA
Hibernate	0.07uA
Entradas/Salidas	7 Analógicas (I), 8 Digitales (I/O), 1PWM, 2 UART

Tabla 5: Características técnicas del ATmega1281

Para el módulo transceptor integrado en el empaquetado, se tiene el módulo “ZigBee 802.15.4-Pro”, cuyas características se muestran en la siguiente tabla (ver Tabla 6).

Características Generales	
Modelo	Xbee-802.15.4 - Pro
Protocolo	802.15.4
Bandas de Frecuencia	868MHz: 20Kbps 915MHz: 40Kbps 2.4GHz: 250Kbps
Tx Power	100mW
Sensitivity	-100dBm
Antenna	Dipole Antenna (RPSMA) 5dBi
Latencia	<15ms
Canales	868/915 MHz: 11 Canales 2.4GHz: 16 Canales
Canal de acceso	CSMA-CA

Tabla 6: Características técnicas del módulo XBee-802.15.4-Pro

Para los dispositivos coordinadores, se hará uso del modelo Meshlium de Libelium, el cual será empleado como Gateway para la red de sensores. De aquí se conectarán todos los nodos finales de cada clúster y servirá de puerta de enlace para conexiones a internet. Este modelo integra 6 diferentes interfaces de radio: Wifi 2.4GHz, Wifi 5GHz, 3G/GPRS, Bluetooth, XBee y LoRa [32].

Una de las características de la capa física de estos modelos, es que se basa en el método de acceso DSSS, que permiten operaciones de bajo consumo de energía. Otra característica es el rango superior de transmisión que se tiene en la banda de frecuencia de 2.4GHz, el cual se puede atribuir a las mejoras en modulación que presenta en comparación con las otras bandas, siendo esta una técnica semi-ortogonal basada en los métodos de DSSS.

4.3.1. Selección de los sensores

En este propósito se muestra el montaje de las dos placas mencionadas en el inciso anterior, de manera cómo se encuentran distribuidas dentro del empaquetado final como se muestra en la Figura 4.3. Es importante mencionar que la estructura del modelo Waspote permite una integración de los sensores, hasta un total de seis por dispositivo, ya que en su estructura incorpora puertos especiales para fácil conexión (ver Figura 4.4).

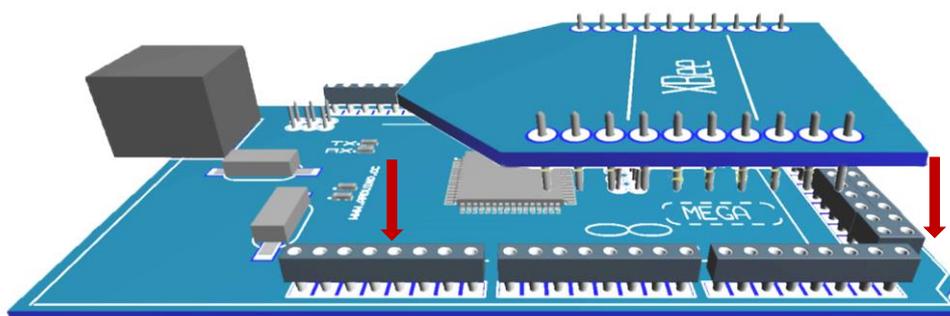


Figura 4.3: Montaje de placas Arduino Mega y XBee-Pro



Figura 4.4: Puertos para conexión de sensores

Para la etapa de sensado se especificarán las diferentes variables a medir y los tipos de sensores que se emplearán con sus características principales.

Sensor de Temperatura y Humedad SHT3x (RH/T)

Sensor digital del fabricante Sensirion, consiste en un chip CMOSens, con excelente rendimiento en términos de precisión, estabilidad y bajo consumo de energía. Su rango de voltaje de alimentación es de 2.4V a 5.5V lo que garantiza compatibilidad con los otros dispositivos. La Tabla 7 muestra las especificaciones técnicas del sensor SHT3x. [33]

ESPECIFICACIONES SENSOR DE TEMPERATURA			
PARAMETRO	CONDICIÓN	VALOR	UNIDADES
Precision, Tolerancia 1	typ., 0 a 65	±0.3	°C
Precision, Tolerancia 2	typ., -40 a 90	±0.3	°C
Precision, Tolerancia 3	typ., -40 a 90	±0.2	°C
Resolución	Typ.	0.015	°C
Rango Específico	-	-40 a 125	°C
Tiempo de Respuesta	ζ63%	>2	s
Long Term Drift	max	<0.03	°C/yr
Voltaje de alimentación	-	min = 2.4 max = 5.5	V
Consumo de Corriente:	Idle	0.2 - 2.0	uA
	Idle(adq. Periodica	45 - 70	uA
	Adquiriendo Data	800 - 1500	uA
	Average	2	uA



Tabla 7: Especificaciones Técnicas Sensor de Temperatura SHT3x.

Sensor de Gases

Sensor del fabricante Libelium modelo Gases Board Pro. La plataforma permite al usuario medir polución y calidad del aire en proyectos industriales, de granja, etc, ofrece alta precisión en las mediciones.

El modelo Gases Pro fundamenta su precisión en la medición exacta del valor ppm de una concentración de gas. [34]

La Tabla 8 presenta los gases de más importancia para este estudio que el sensor permite medir, cabe mencionar que permite una medición de 16 gases diferentes en total.

ESPECIFICACIONES SENSOR DE GASES		
PARAMETRO	RANGO	CONSUMO MÁX
Presión	30 - 110 kPa	4.2 uA - 3V3
Monóxido de Carbono (CO)	0 - 500 ppm	351 uA - 3V3
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0 - 5000 ppm	85 mA - 3V3
Moléculas de Oxígeno (O ₂)	0 - 30%	402 uA - 3V3
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0 - 20 ppm	333 uA - 3V3
Metano y otros gases combustibles (CH ₄)	0 - 100%	68 mA - 3V3



Tabla 8: Especificaciones Técnicas Sensor Libelium Gases Pro.

Sensor de Radiación Ultravioleta – UV

Sensor del fabricante Apogee modelo SU-100, permite al usuario realizar mediciones de niveles de radiación ultravioleta en ambientes exteriores, adicionalmente provee factores de calibración para la densidad de fluido de fotones, permitiendo al sensor realizar rápidas conversiones. Posee un domo o estructura que permite que el agua de lluvia se escurra fácilmente minimizando así errores por bloqueos de polvo o agua en el eje de radiación. [35]

La Tabla 9 muestra las especificaciones técnicas del sensor SU-100.

Características Generales	
Salida (Sensibilidad)	0.20 mV por umol
Long-Term Drift	<3% por año
Rango Espectral	250nm a 400nm
Ambiente de Operación	-40 a 70 C
Dimensiones	24mm diametro 28mm altura



Tabla 9: Características técnicas del Sensor SU-100.

Sensor de Audio/Ruido

Sensor POM-2735P-R del fabricante Pui Audio, que permite el monitoreo del ruido ambiental, se trata de un micrófono omnidireccional que ofrece una respuesta plana a todas las frecuencias auditivas, conformadas entre los 20Hz y 20KHz. Este dispositivo permite un monitoreo del ruido para diferentes ambientes como son: Ambientes silenciosos, conversaciones normales, tráfico pesado, ruidos extremos, etc. [35]. La Tabla 10 muestra las características técnicas generales del sensor de ruido.

Características Generales	
Especificaciones	Niveles
Sensibilidad	-35 dB
Impedancia	<2.2kohms
Directividad	Omnidireccional
Frecuencia	20Hz - 20KHz
Voltaje de Alimentacion	+3V

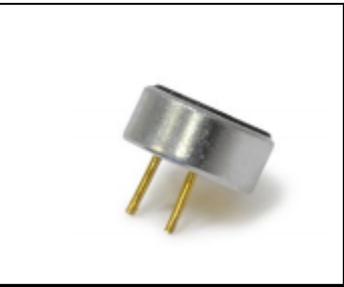


Tabla 10: Características técnicas del sensor de ruido.

4.4. Comprobación de LOS y Zona Fresnel

En el inciso anterior se detallaron las condiciones del escenario y de las diferentes variables que podrían afectar el enlace de comunicación.

En este mismo orden, para garantizar un correcto enlace, se verificará en todos los trayectos que al menos la primera zona Fresnel se encuentre libre de obstrucciones. Para efectos del cálculo se tomará en consideración la siguiente ecuación para la obtención de radios Fresnel:

$$h_n = \sqrt{\frac{n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \quad (8)$$

En donde n es el radio Fresnel.

λ la longitud de onda.

D_1 la distancia entre el transmisor y el obstáculo en análisis.

D_2 la distancia entre el obstáculo en análisis y el receptor.

Como resultado se obtuvo que el mayor radio Fresnel que se muestra entre todos los enlaces, está a 1.77 metros por debajo del trayecto de línea de vista, este valor disminuirá en relación con la distancia de separación de los nodos.

De los anteriores planteamientos se puede deducir que como condición necesaria para que exista un correcto sistema de comunicación, un enlace continuo sin cortes, se debe garantizar que la distancia mencionada, a lo largo de todo el trayecto de línea de vista, se mantenga libre oclusión.

4.5. Parámetros de Configuración

Para nuestro estudio se realizó un monitoreo, en los canales adyacentes a nuestra frecuencia central, de la potencia de otras señales coexistiendo en el mismo escenario. De un promedio de 350000 capturas de potencias recibidas, se logró determinar que para nuestro escenario en análisis el canal 19 es el óptimo para ser empleado en este estudio, debido a que este tiene en promedio la menor potencia recibida de señales interferentes que se encuentran en canales adyacentes y que solapan a nuestra señal de interés. De los resultados se obtuvo los siguientes niveles de potencia de ruido para el escenario en análisis:

$P_{\text{noise}_{\text{min}}} = -80 \text{ dBm}$; $P_{\text{noise}_{\text{mean}}} = -72 \text{ dBm}$; $P_{\text{noise}_{\text{máx}}} = -68 \text{ dBm}$;

En el marco de las consideraciones anteriores, se describe a continuación los parámetros físicos y de radiofrecuencia configurados en cada uno de los nodos (ver Tabla 11 y Tabla 12).

CONFIGURACIONES FÍSICAS			
NODOS	LOGITUD	LATITUD	ALTURA (mts)
Node 1 Cluster 1	-79.9086	-2.10539	10
Node 2 Cluster 1	-79.9086	-2.10477	10
Cluster 1 Coordinator	-79.9083	-2.10507	10
Node 1 Cluster 2	-79.9082	-2.10294	10
Node 2 Cluster 2	-79.9079	-2.10346	10
Cluster 2 Coordinator	-79.9078	-2.10306	10
Nodo 1 Cluster 3	-79.9061	-2.10311	10
Cluster 3 Coordinator	-79.9065	-2.10357	10
PAN Coordinator 1	-79.9079	-2.10442	10
PAN Coordinator 2	-79.9074	-2.10373	10

Tabla 11: Configuraciones físicas de los nodos

PARÁMETROS DE RADIOFRECUENCIA	
ANCHO DE BANDA DEL CANAL	3MHz
CANAL	19
FRECUENCIA CENTRAL	2445MHz
PTx	100mW
GTx	5dBi
GRx	5dBi
Sensibilidad	-102dBm

Tabla 12: Parámetros de Radiofrecuencia

4.6. Análisis de Resultados

Una vez establecidos los parámetros de configuración para los enlaces de comunicación, y bajo la directriz de la metodología descrita en el capítulo 3, se detallarán a continuación los resultados obtenidos sobre capacidad máxima del canal, Throughput y SNR.

Es importante mencionar que, para efectos gráficos, los enlaces obtenidos se los representarán mediante líneas de colores, en donde cada color simbolizará el throughput alcanzado. En la Tabla 13 se muestra la codificación de colores.

Velocidad de Transmisión	Color
250 Kbps.	Magenta
500 Kbps.	Verde
1Mbps.	Negro
2Mbps o mayores.	Azul

Tabla 13: Colores según velocidad de transmisión.

En la Figura 4.5 se muestra el posicionamiento de los nodos dentro de la interfaz gráfica de Matlab, en donde se puede apreciar claramente cada uno y en que clúster se encuentra ubicado.

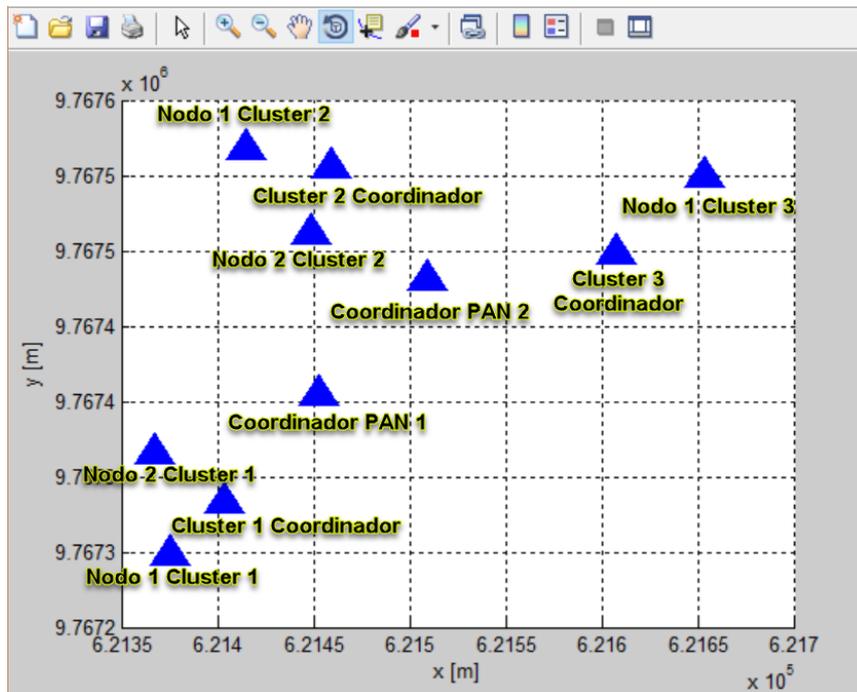


Figura 4.5: Posicionamiento de nodos por clusters.

Para mejor apreciación gráfica de los enlaces establecidos en la red, la simulación se la ha dividido en dos partes. La primera integra todos los enlaces entre los nodos finales y nodos coordinadores, y la segunda integra los enlaces entre nodos coordinadores. Se tomaron dos enlaces de ejemplo para verificar paso a paso los cálculos realizados en la simulación (ver Anexo 2).

4.6.1. Enlaces entre nodos finales y coordinadores

4.6.1.1. Escenario con Pnoise = -68 dBm

En la Figura 4.6 se observa el resultado de los enlaces establecidos dentro de cada uno de los clústers con el parámetro Pnoise = -68 dBm y adicionalmente el throughput alcanzado por estos.

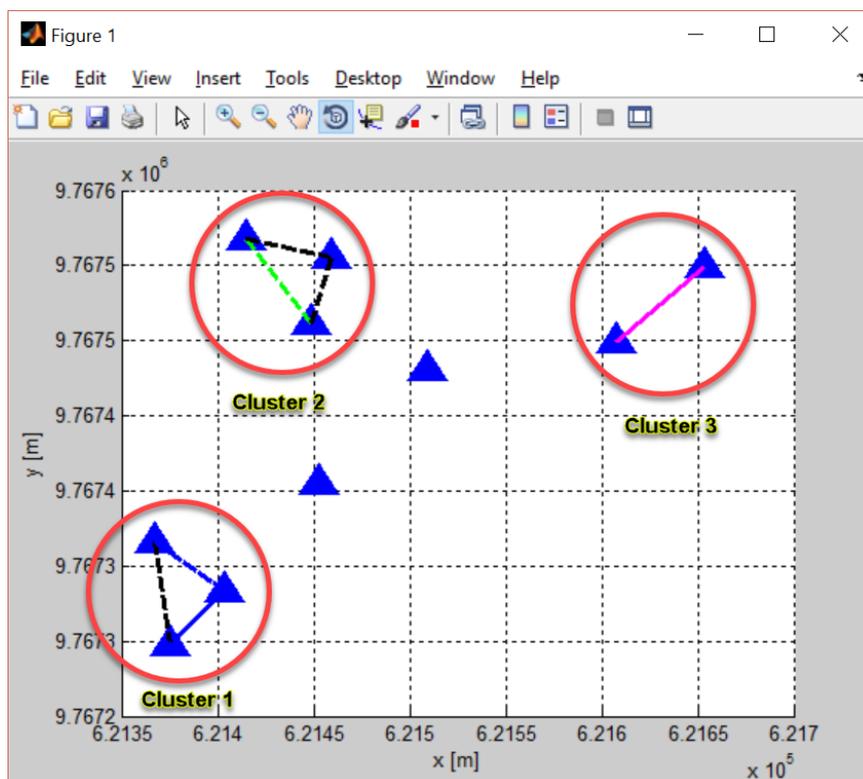


Figura 4.6: Enlaces establecidos en la red con Pnoise = -68dBm

Para los enlaces establecidos en cada uno de los clusters, se describirá a continuación la tasa de transmisión de datos alcanzada. Es importante mencionar que la tasa de transmisión que se describirá en cada uno de los enlaces se basa en la relación señal a ruido que se obtuvo en los cálculos anteriores, y no necesariamente expresa la tasa de transmisión de datos que se obtendría en campo, debido a que se tienen un límite impuesto por las características inherentes al dispositivo.

Clúster 1:

Para la comunicación entre los dispositivos finales y el Coordinador se tienen tasas de transmisión de hasta 2 Mbps.

Clúster 2:

Para el enlace entre el nodo1 y el Coordinador se tienen tasas de transmisión de hasta 1 Mbps.

Para el enlace entre el nodo 2 y el Coordinador se tienen tasas de transmisión de hasta 500 Kbps.

Clúster 3:

Para el enlace entre el nodo1 y el Coordinador se tienen tasas de transmisión de hasta 250 Kbps.

4.6.1.2. Escenario con Pnoise = -72 dBm

En la Figura 4.7 se observa el resultado de los enlaces establecidos dentro de cada uno de los clústers con el parámetro Pnoise = -68 dBm

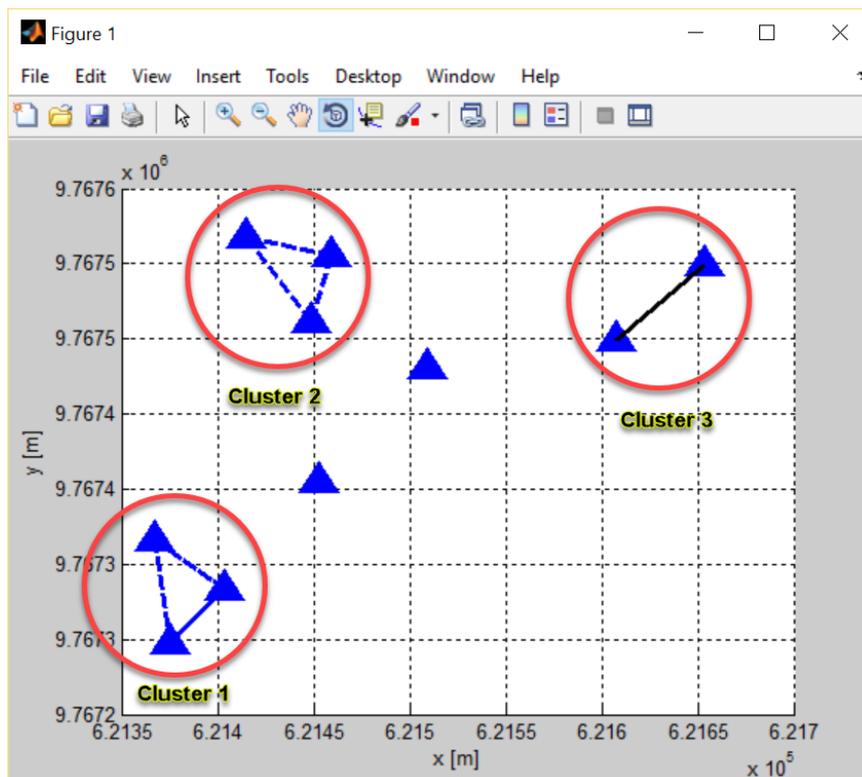


Figura 4.7: Enlaces establecidos en la red con Pnoise = -72dBm

Clúster 1 y Clúster 2:

Para la comunicación entre los dispositivos finales y el Coordinador se tienen tasas de transmisión de hasta 2 Mbps.

Clúster 3:

Para el enlace entre el nodo1 y el Coordinador se tienen tasas de transmisión de hasta 1 Mbps.

4.6.1.3. Escenario con Pnoise = -80 dBm

En la Figura 4.8 se observa el resultado de los enlaces establecidos dentro de cada uno de los clústers con el parámetro Pnoise = -80 dBm y adicionalmente el throughput alcanzado por estos

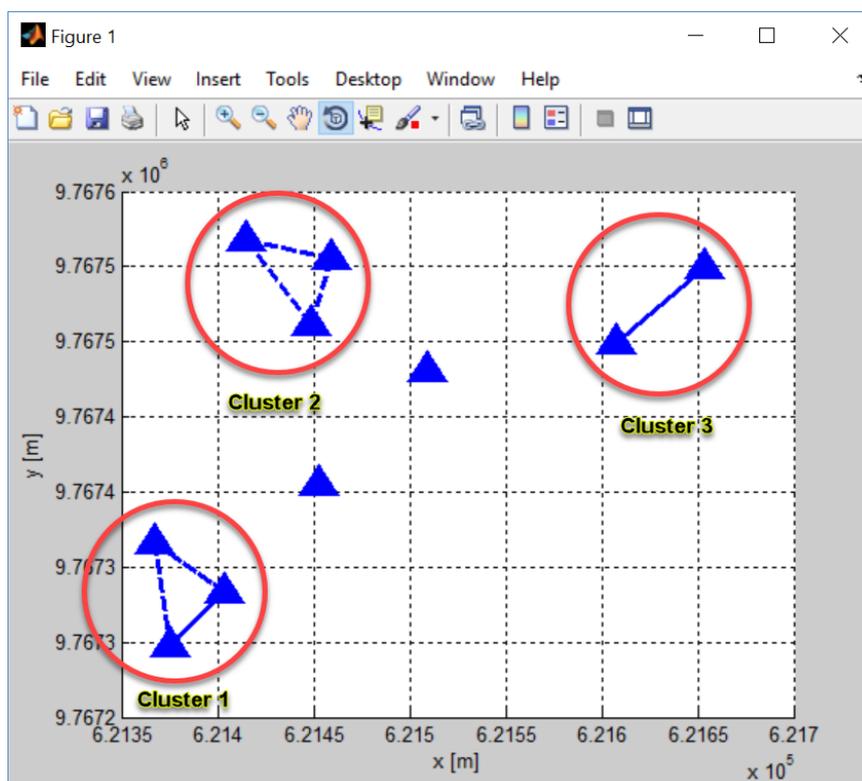


Figura 4.8: Enlaces establecidos en la red con Pnoise = -80dBm

Clúster 1, Clúster 2 y Clúster 3:

Para la comunicación entre los dispositivos finales y el Coordinador se tienen tasas de transmisión de 2 Mbps.

En las simulaciones se consideró también el caso en donde los nodos transmitan a la mitad de su potencia máxima, es decir aproximadamente 17 dBm y se encuentren bajo un escenario con $P_{noise} = -68$ dBm. Para estos parámetros establecidos, los resultados fueron los siguientes:

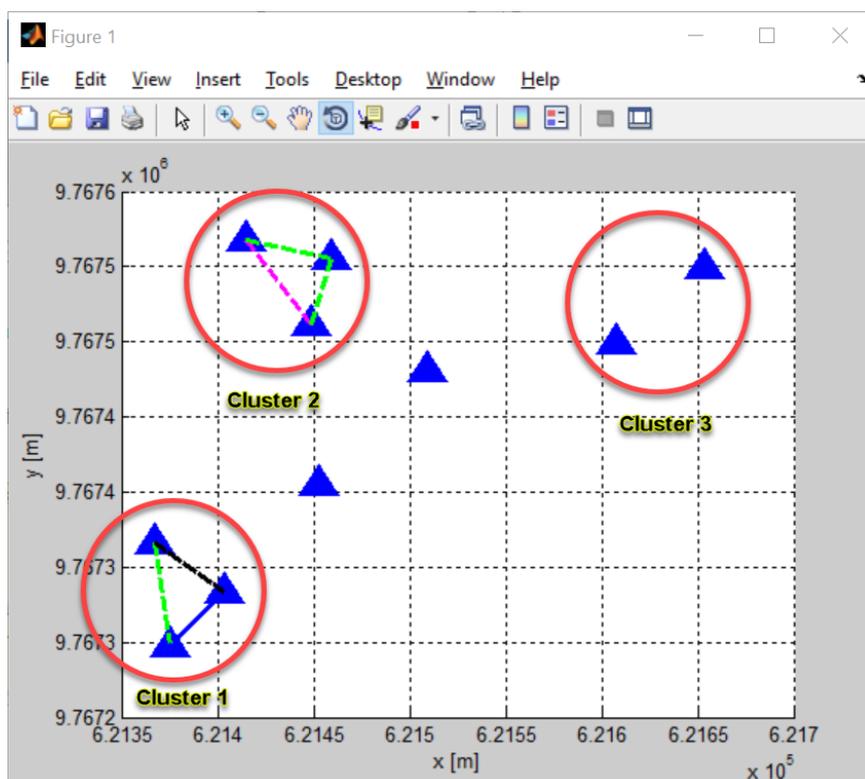


Figura 4.9: Escenario con $P_{noise} = -68$ dBm y $P_{tx} = 17$ dBm

Como se observa claramente en la Figura 4.9 para las condiciones dadas se garantiza un enlace entre todos los dispositivos dentro del clúster 1 y 2. Para el caso del clúster 3 se observa que no fue posible obtener un enlace entre el dispositivo final y el coordinador debido a que se obtuvo un SNR bajo.

Como solución ante la situación antes planteada, se propone aumentar las ganancias de las antenas para transmisión y recepción de 5 a 8 dBi. Los resultados para el caso en análisis fueron los siguientes:

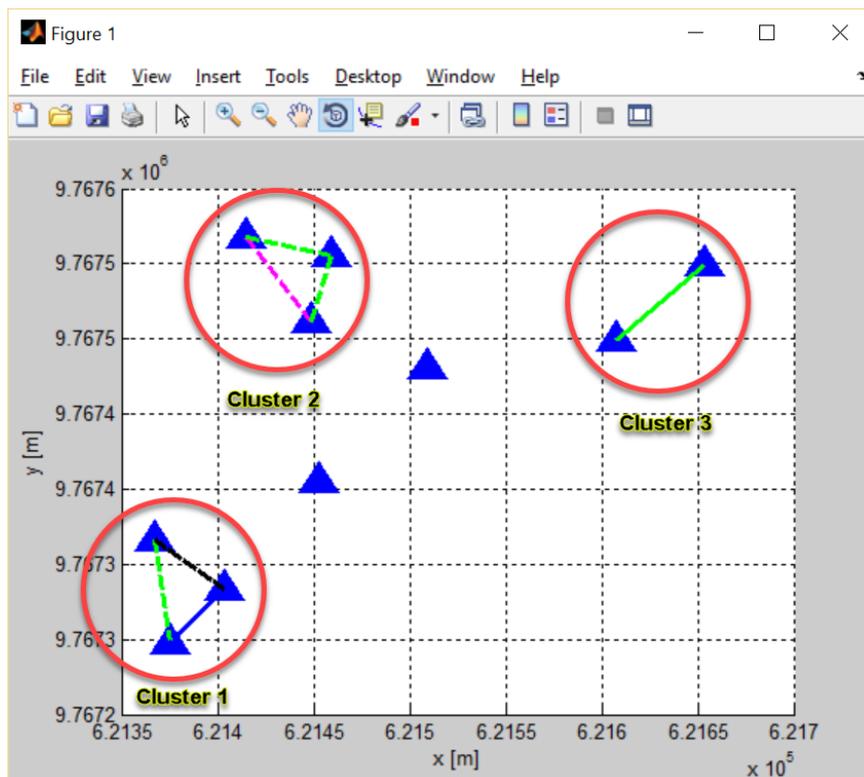


Figura 4.10: Escenario con $P_{noise} = -68\text{dBm}$, $P_{tx} = 17\text{dBm}$ y $G_{t/rx} = 8\text{dBi}$.

Como se observa claramente en la Figura 4.10 se logró establecer enlaces entre todos los dispositivos finales dentro de los clusters y para el caso del clúster 3, se logró obtener un enlace entre el dispositivo final y el coordinador con una tasa de transmisión de 500 Kbps.

4.6.2. Enlaces entre nodos coordinadores

4.6.2.1. Escenario con Pnoise = -68 dBm

En la Figura 4.11 se observa el resultado de los enlaces establecidos dentro de los dispositivos coordinadores con parámetro Pnoise = -68 dBm y adicionalmente el throughput alcanzado por estos.

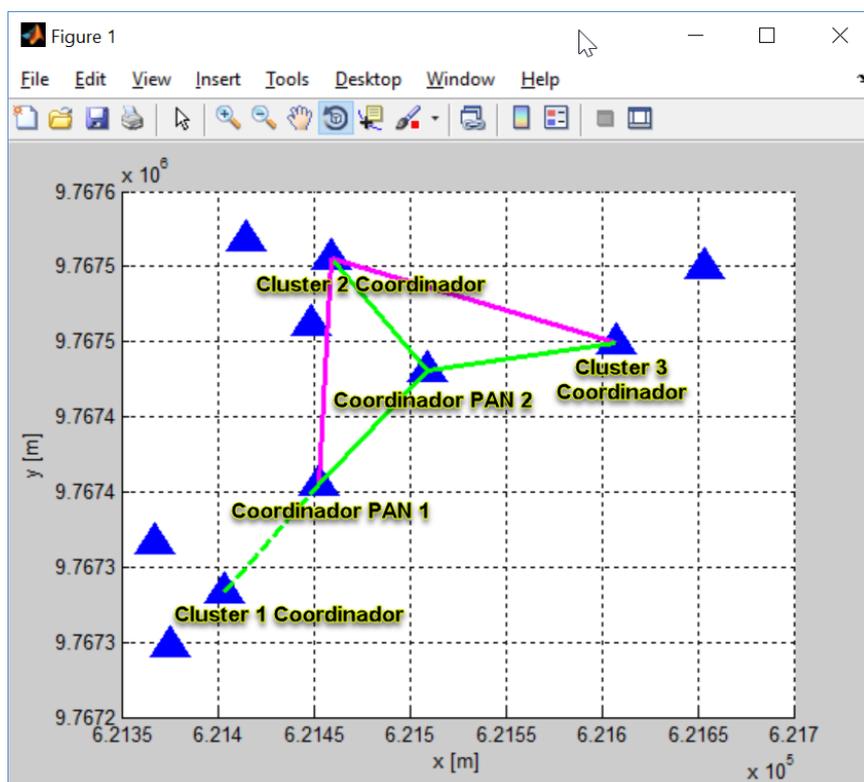


Figura 4.11: Enlaces entre dispositivos coordinadores Pnoise = -68dBm.

Como se puede verificar, se logró establecer una comunicación entre todos los dispositivos coordinadores de la red, alcanzado tasas de transmisión de hasta 500 Kbps en ciertos enlaces.

4.6.2.2. Escenario con Pnoise = -72 dBm

En la Figura 4.12 se observa el resultado de los enlaces establecidos dentro de los dispositivos coordinadores con parámetro Pnoise = -72 dBm y adicionalmente el throughput alcanzado por estos.

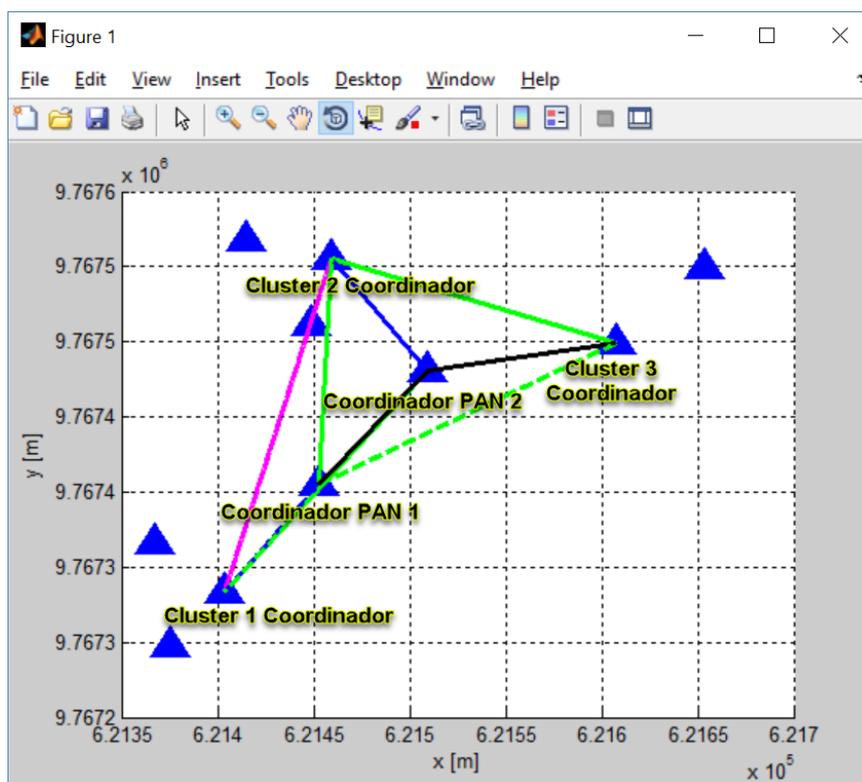


Figura 4.12: Enlaces entre dispositivos coordinadores Pnoise = -72dBm.

Como se puede verificar, se logró establecer una comunicación entre todos los dispositivos coordinadores de la red, alcanzado tasas de transmisión de hasta 2 Mbps en ciertos enlaces.

4.6.2.3. Escenario con Pnoise = -80 dBm

En la Figura 4.13 se observa el resultado de los enlaces establecidos dentro de los dispositivos coordinadores con parámetro Pnoise = -80 dBm y adicionalmente el throughput alcanzado por estos.

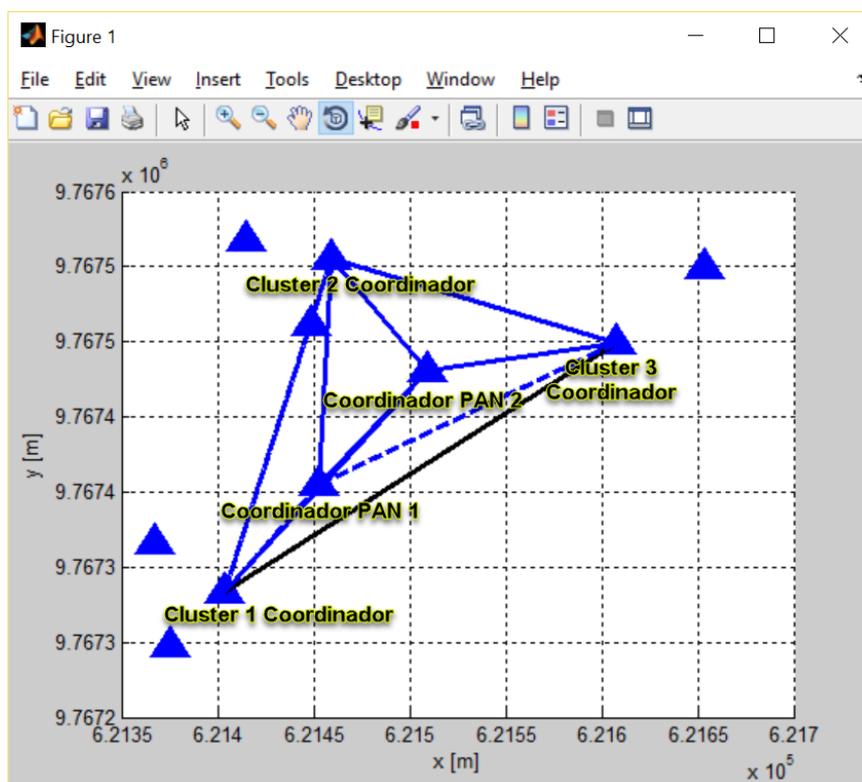


Figura 4.13: Enlaces entre dispositivos coordinadores Pnoise = -80dBm.

Como se puede verificar, se logró establecer una comunicación entre todos los dispositivos coordinadores de la red, alcanzado tasas de transmisión de hasta 2 Mbps en ciertos enlaces.

De igual manera se consideró el caso en donde los nodos transmiten a la mitad de su potencia máxima, es decir aproximadamente 17 dBm y se encuentren bajo un escenario con $P_{noise} = -68$ dBm. Para estos parámetros establecidos, los resultados fueron los siguientes:

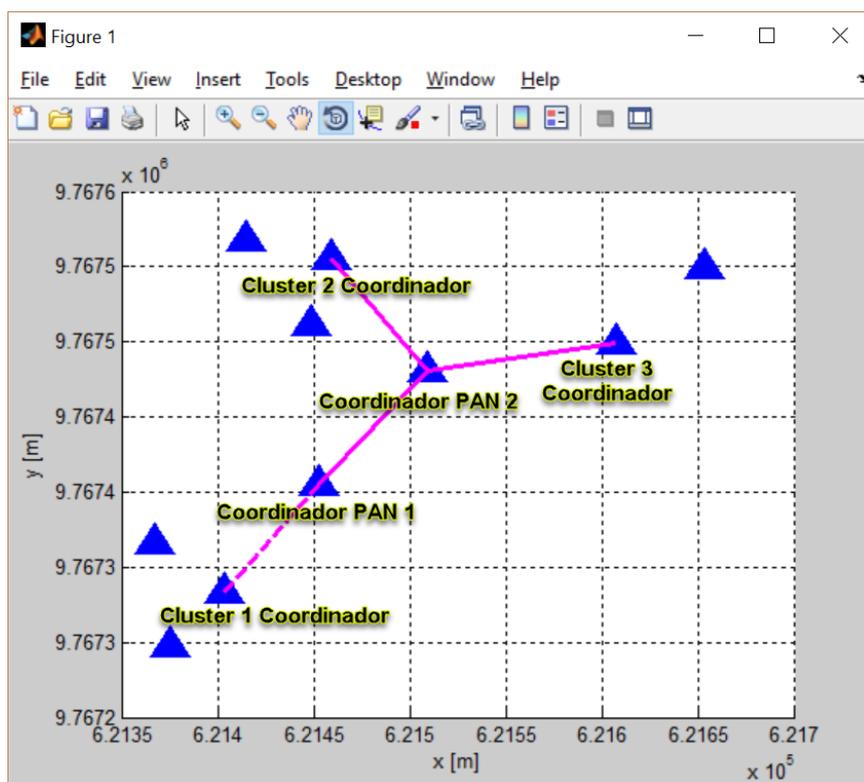


Figura 4.14: Escenario con $P_{noise} = -68$ dBm y $P_{t/rx} = 17$ dBm.

Como se observa claramente en la Figura 4.14 para las condiciones dadas se garantiza una comunicación entre todos los dispositivos coordinadores de la red, pero con tasas de transmisión de hasta 250 Kbps.

De la misma manera que el caso anterior, para lograr mayores tasas de transmisión, se propone aumentar las ganancias de las antenas transmisoras y receptoras de 5 a 8 dBi. Para estos parámetros establecidos, los resultados fueron los siguientes:

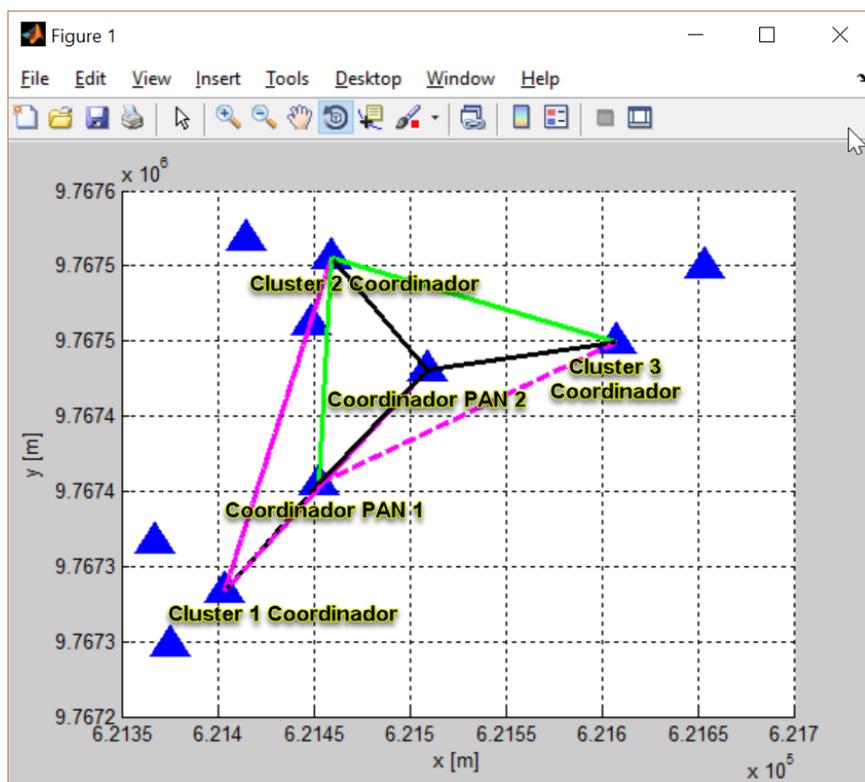


Figura 4.15: Escenario con $P_{noise} = -68\text{dBm}$, $P_{tx} = 17\text{dBm}$ y $G_t/r_x = 8\text{dBi}$.

Como se puede observar en la Figura 4.15, se logró establecer una comunicación entre todos los dispositivos coordinadores de la red, alcanzado tasas de transmisión de hasta 1 Mbps en ciertos enlaces.

4.6.3. Análisis de las funciones CDF

En las imágenes presentadas a continuación, se puede observar las distribuciones de probabilidad acumulada de los datos empíricos obtenidos en las simulaciones, las cuales nos permiten representar el comportamiento de los diferentes enlaces establecidos considerando todos los escenarios antes descritos.

4.6.3.1. CDF empírica para Capacidad Máxima del Canal

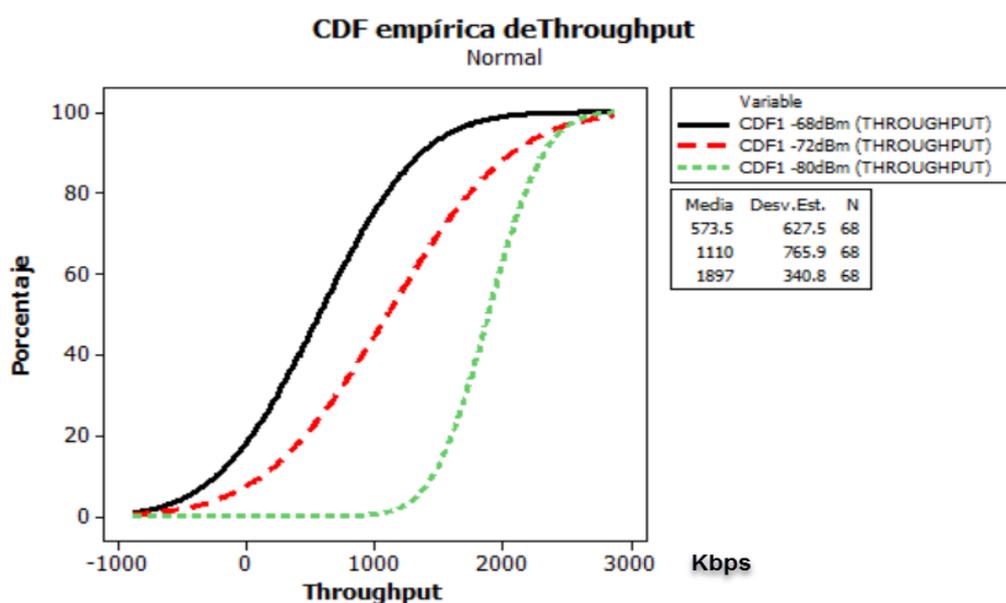


Figura 4.16: CDF empírica de Throughput

En la Figura 4.16 se observa claramente que para un escenario con Pnoise de -80 dBm se garantizan enlaces con throughput mayor a 1 Mbps, a diferencia de un escenario con Pnoise de -72 y -68 dBm en los cuales se tiene aproximadamente un 12% y 30% respectivamente, de enlaces en los cuales no se garantiza un throughput mayor a 250 Kbps, los cuales pueden atribuirse a aquellos enlaces complementarios formados entre dispositivos lejanos que ofrecen redundancia en la red.

4.6.3.2. CDF empírica para Capacidad Máxima del Canal

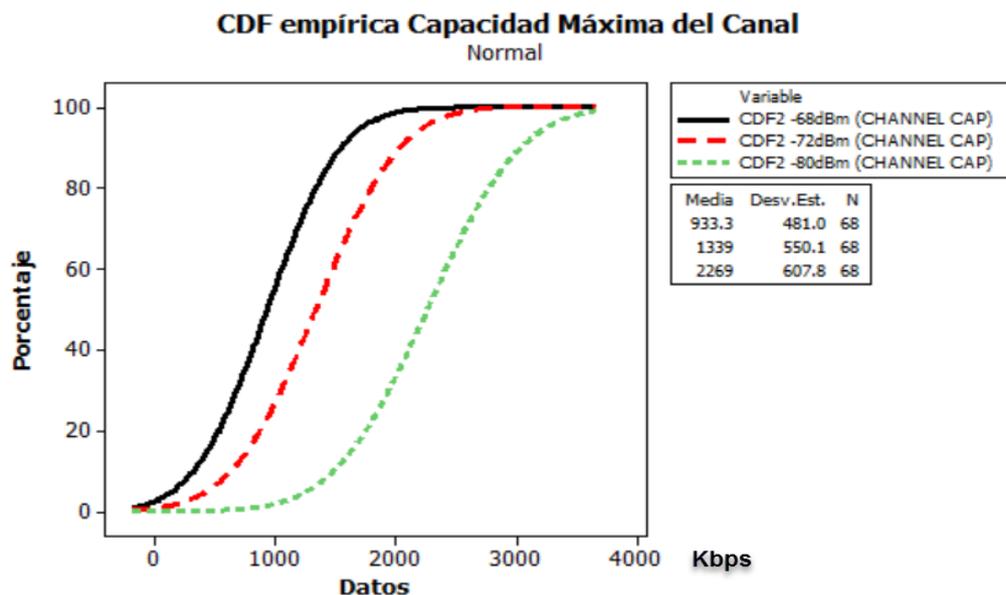


Figura 4.17: CDF empírica de Capacidad máxima del Canal.

En la Figura 4.17 se observa claramente que para un escenario con P_{noise} de -80 dBm se garantiza una capacidad de canal mayor a 1 Mbps para el 98% de las muestras, a diferencia de un escenario con P_{noise} de -72 y -68 dBm en los cuales se observa una capacidad de canal mayor a 1 Mbps para el 72% y 42% de las muestras respectivamente, lo que quiere decir que la capacidad del canal depende firmemente de las propiedades físicas del medio.

4.6.3.3. CDF empírica para SNR

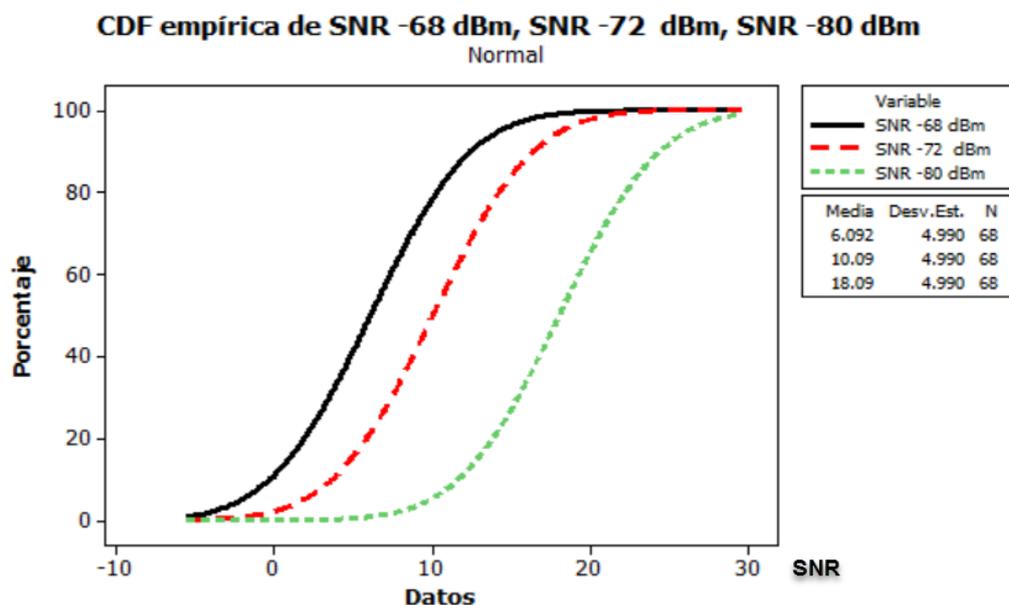


Figura 4.18: CDF empírica de SNR

En la Figura 4.18 se observa claramente que para escenarios con una potencia de ruido de -80 dBm se garantiza para todas las muestras un SNR mayor a 10, es decir que se tendrían altos valores para capacidad del canal y a su vez altas velocidades de transmisión.

Para los escenarios con potencia de ruido de -72 dBm y -68 dBm, se garantiza un SNR mayor 3 para un 93% y 78% de las muestras respectivamente. Aquellos enlaces en donde no se garantiza un alto SNR y throughput puede ser atribuido a aquellos enlaces complementarios, formados entre dispositivos lejanos que ofrecen redundancia en la red.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Como resultado de los análisis estadísticos presentados, se pudo comprobar como el throughput alcanzado en cada uno de los enlaces de la red, se relaciona firmemente con las propiedades físicas del medio, es decir en escenarios con mayor interferencia de ruido externo, se alcanzaron menores tasas de transmisión que en escenarios con bajos niveles de ruido y viceversa.
2. Para los resultados obtenidos, se puede concluir que para los escenarios analizados se logró establecer enlaces entre todos los dispositivos que conforman la red. Adicionalmente a esto se logró establecer enlaces entre todos los dispositivos, considerando el peor de los escenarios en donde los nodos transmitan a la mitad de su potencia máxima y en un entorno afectado por altos niveles de ruido.
3. Los numerosos dispositivos empleando las bandas de frecuencia de uso libre (ISM), ocasionan que el enlace de comunicación se encuentre más propenso a interferencias externas produciendo errores en la recepción, y a su vez reduciendo el caudal eficaz real (throughput) debido a la cantidad de retransmisiones realizadas.
4. El uso del estándar 802.15.4 en el presente estudio no fue por la obtención de altas velocidades de transmisión, ya que esta se encuentra limitada, sino su bajo consumo energético y bajo ciclo de servicio permitiendo al CSMA obtener resultados robustos, debido a que el canal permanecerá libre en la mayoría del tiempo.
5. El diseño de la red de sensores encargada del monitoreo de los diferentes indicadores atmosféricos considerados como relevantes para la evaluación de ambientes nocivos para los seres humanos, constituirá un método efectivo para la prevención de las diferentes enfermedades que afectan la salud de la población.

Recomendaciones

1. Este proyecto servirá como piloto para futuros estudios, debido a la importancia que tiene en el ámbito ambiental, y podría ser implementado a nivel nacional en las diferentes áreas de recreación.
2. Se debe impulsar estudios complementarios que permitan mejorar los niveles de fiabilidad en las comunicaciones inalámbricas ya que al tener un medio compartido como el espacio libre se tienen varias fuentes de interferencia.
3. Es recomendable realizar una completa identificación del escenario, en donde se nos permita comprobar de manera visual el lugar donde se espera colocar los nodos, y no únicamente guiarse por las coordenadas obtenidas mediante softwares de localización geográfica, ya que esto nos garantizará que no existan obstrucciones en las diferentes líneas de vista que se tienen entre los enlaces.
4. Para la presentación de los resultados, es recomendable tomar las medidas necesarias para que las gráficas estén claras y sean fáciles de entender. En nuestro estudio se dividió los resultados en dos etapas, para una mejor apreciación gráfica de los enlaces obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] OMS, «Plan Regional sobre Calidad del Aire Urbano,» 2009. [En línea]. Available:<http://www.bvsde.paho.org/bvsci/e/fulltext/planreg/planes05.pdf>. [Último acceso: 20 06 2016].
- [2] OPS/OMS, «La Salud y el Ambiente en el Desarrollo Sostenible,» 2000. [En línea]. Available:<http://www1.paho.org/hq/dmdocuments/salud-ambiente-desarrollo-sostenible2000.pdf>. [Último acceso: 18 06 2016].
- [3] OMS, «Calidad del aire (exterior) y Salud,» 2006. [En línea]. Available:<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>. [Último acceso: 21 06 2016].
- [4] C. Paez, «Diagnóstico de la Gestión de la Calidad del aire en el Ecuador para la definición de Políticas y estrategias,» 2008. [En línea]. Available:<http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/libro-calidad-aire-1-final.pdf>. [Último acceso: 15 07 2016].
- [5] Franklin Bucheli, Iván Coronel, Eduardo Idrovo, Angel Espinoza, «Manual de Gestión Ambiental,» 2000. [En línea]. Available:http://www.cuenca.gob.ec/biblicuenca/opac_css/index.php?lvl=autor_see&id=3198. [Último acceso: 15 06 2016].
- [6] E. P. Espinoza, «Contaminación del Aire Exterior,» 2006. [En línea]. Available:<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/22965/1/Dra%20Elvira%20palacios%20ing%20Claudia%20Espinoza.pdf>. [Último acceso: 06 2016].

- [7] M. T. G. Gualtieri, «Transportation Research Part D: Transport and Environment,» 1998. [En línea].
Available:<http://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-d-transport-and-environment>.
- [8] I. workshop, «Educating the public about the hazards of ultraviolet radiation,» 2001. [En línea].
Available:<http://www.who.int/uv/publications/proUVrad.pdf>. [Último acceso: 15 07 2016].
- [9] J. U. E. V. J. R. J. C. B. N. Antonio Lozano, «Air quality monitoring network design to control nitrogen dioxide and ozone,» 2009. [En línea].
Available:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X09000897>. [Último acceso: 22 06 2016].
- [10] F. Telefónica, «Smart Cities: un primer paso hacia la internet de las cosas,» 2011. [En línea].
Available:http://www.socinfo.es/contenido/seminarios/1404smartcities6/01-TelefonicaSMART_CITIES-2011.pdf.
- [11] E. d. o. industrial, «Smart City! Las ciudades del presente,» [En línea].
Available:<http://www.eoi.es/blogs/redinnovacionEOI/2015/10/03/smart-city-las-ciudades-del-presente/>. [Último acceso: 11 06 2016].
- [12] eSMARCITY, «Smart City, todo sobre ciudades inteligentes,» 03 02 2015. [En línea].
Available:<https://www.esmartcity.es/noticias/sistema-de-sensores-para-medir-la-contaminacion-atmosferica-en-malaga>. [Último acceso: 18 06 2016].
- [13] E. I. H. y. D. C. Alejandro Cama, «Las redes de sensores inalámbricos y el Internet de las cosas,» *INGE CUC*, vol. 8, nº 1, pp. 163 - 172, 2012.
- [14] C. B. Z. Shelby, «6LoWPAN: the wireless embedded internet,» 2011. [En línea].
Available:<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470747994.html>.

- [15] F. K. D. F. V. G. Kortuem, «Smart objects as building blocks for the Internet of things,» 2010. [En línea].
Available:<https://www.computer.org/csdl/mags/ic/2010/01/mic2010010044-abs.html>. [Último acceso: 14 06 2016].
- [16] R. W. Q. C. Y. L. W. Q. Quian Zhu, «IOT Gateway: bridging wireless sensor networks into internet of things,» 2010. [En línea].
Available:<http://ieeexplore.ieee.org/document/5703542/>. [Último acceso: 12 07 2016].
- [17] A. Sánchez, «Smart Cities y Medio Ambiente: Calidad del Aire,» 07 05 2013. [En línea].
Available:<http://www.i-ambiente.es/?q=blogs%2Fsmart-cities-y-medio-ambiente-calidad-del-aire-i>. [Último acceso: 12 07 2016].
- [18] Endesa, «Smart Cities,» Enel, [En línea].
Available:http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/. [Último acceso: 10 07 2016].
- [19] A. Asín, «Smart Cities - Libelium World,» 2011. [En línea].
Available: http://www.libelium.com/smart_cities/. [Último acceso: 17 07 2016].
- [20] J. M. Huidobro, «Redes de sensores inalámbricos,» 22 10 2014. [En línea].
Available:<http://www.zonamovilidad.es/noticia/6731/reportajes/redes-de-sensores-inalambricos.html>.. [Último acceso: 04 07 2016].
- [21] F. O. Tapia, «Redes de sensores inalámbricos. Wireless Sensor Networks (WSN),» [En línea].
Available:http://profesores.elo.utfsm.cl/~tarredondo/info/networks/Presentacion_sensores.pdf. [Último acceso: 15 07 2016].
- [22] Z. Alliance, ZigBee Alliance, [En línea].
Available: <http://www.zigbee.org/what-is-zigbee/>. [Último acceso: 15 06 2016].
- [23] J. Wexler, «Anexo I. Protocolo ZigBee,» [En línea].
Available:<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf>. [Último acceso: 01 07 2016].

- [24] Z. Alliance, «ZigBee PRO with Green Power,» ZigBee Alliance, [En línea]. Available:<http://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/network-specifications/zigbeepro/>. [Último acceso: 10 07 2016].
- [25] I. C. Society, «Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS),» 2003. [En línea]. Available:<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2FielD%2F4152702%2F4152703%2F04152704.pdf&authDecision=-203>.
- [26] Y. H. L. Y. S. Meng, "INVESTIGATIONS OF FOLIAGE EFFECT ON MODERN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS," 2010. [Online]. Available:<http://www3.ntu.edu.sg/home/eyhlee/Prof%20Lee/PIER%20foliage%20review%202010.pdf>. [Accessed 08 2016].
- [27] J. Mayné, «IEEE 802.15.4 y ZigBee,» [En línea]. Available:<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf>.
- [28] J. S. Seybold, «Near - Earth Propagation Models,» 2005. [En línea]. Available:<http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0471655961.html>.
- [29] A. d. R. d. I. UIT, «Recomendación UIT-R P.525-2 Cálculo de la atenuación en el espacio libre,» 2009. [En línea]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-2-199408-!!!PDF-S.pdf. [Último acceso: 07 2016].
- [30] S. Sen, R. R. Choudhury y S. Nelakuditi, «CSMA/CN: Carrier Sense Multiple Access with Collision Notification,» 2010. [En línea]. Available: <http://synrg.csl.illinois.edu/papers/cn-mobicom.pdf>. [Último acceso: 1 8 2016].
- [31] L. C. D. S.L, «Wasmote Plug & Sense Technical Guide,» 02 2016. [En línea]. Available:<http://www.libelium.com/development/plugsense/documentation/wasmote-plug-sense-technical-guide/>. [Último acceso: 22 07 2016].

- [32] L. C. Distribuidas, «Meshlium Xtreme,» [En línea].
Available: <http://www.libelium.com/products/meshlium/>. [Último acceso: 06 2016].
- [33] S. -. T. s. Company, «Datasheet SHT3x-DIS - Humidity Temperature Sensor,» Agosto 2016. [En línea].
Available:<https://www.sensirion.com/about-us/company/portrait/>. [Último acceso: 22 Agosto 2016].
- [34] L. C. D. S.L., «Gases 2.0 Pro Technical Guide,» Libelium, Octubre 2015. [En línea].
Available:<http://www.libelium.com/development/waspmote/documentation/gases-board-technical-guide/>. [Último acceso: 22 Agosto 2016].
- [35] Libelium, «Smart Cities: Technical Guide,» 2006. [En línea].
Available:<http://www.libelium.com/development/waspmote/documentation/smart-cities-board-technical-guide/>. [Último acceso: 1 08 2016].
- [36] I. C. Society, «IEEE Standards 802.15.4,» de *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for LR-WPANs*, New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2003.
- [37] E. Méndez, «Redes Inalámbricas para Zonas Rurales,» Madrid, 2008.
- [38] J. M. Moreno y Daniel Ruiz Fernández, «Informe Técnico: Portocolo ZigBee,» Junio 2007. [En línea].
Available:https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/7/Informe_ZigBee.pdf. [Último acceso: 1 08 2016].
- [39] J. M. Moreno y D. R. Fernández, «Informe Técnico: Protocolo ZigBee,» Junio 2007. [En línea].
Available:https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/7/Informe_ZigBee.pdf. [Último acceso: 1 08 2016].

ANEXOS

ANEXO 1

Con la finalidad de una mejor presentación gráfica de los resultados, se procedió a realizar la simulación por partes, una que representa los enlaces establecidos entre los dispositivos finales y el coordinador, y otra parte que simula los enlaces establecidos entre los dispositivos coordinadores de la red.

Código Fuente para enlaces entre nodos finales y nodo coordinador

El siguiente código simula los enlaces establecidos entre los dispositivos finales con los coordinadores de cada clúster.

```
clear all,close all,clc
%% Determinación de puntos / coordenadas UTM %%
%% Se describe la posición de cada nodo (final y nodo
coordinador)descrito como NxCx, %%
%% donde "x" es el número del nodo y "y" el número del clúster. %%
%% Se simulan todos los enlaces entre nodos finales y el coordinador
de cada clúster %%
num_ap=3; % Número sensores totales del clúster 1
N1C1x = 621375.755309369;
N1C1y = 9767248.05115499;

N2C1x = 621367.152185033;
N2C1y = 9767315.92488512;

N1C2x = 621414.871613813;
N1C2y = 9767518.256;

N2C2x = 621449.124700558;
N2C2y = 9767461.41995909;

N1C3x = 621653.983284992;
N1C3y = 9767499.36037645;

CC1x = 621403.275901671;
CC1y = 9767283.04362863;

CC2x = 621459.660072202;
CC2y = 9767505.63329177;

CC3x = 621607.914711467;
CC3y = 9767448.7230732;
```

```

CP1x = 621453.066465343;
CP1y = 9767354.55786979;

CP2x = 621509.348469873;
CP2y = 9767431.28561664;

h = 10; %% altura de nodos %%
%% Matrices de posiciones %%
P=[N1C1x N1C1y h; N2C1x N2C1y h; CC1x CC1y h]; %% Nodos del Clúster 1
P2=[N1C2x N1C2y h; N2C2x N2C2y h; CC2x CC2y h]; %% Nodos del Clúster 2
P3=[N1C3x N1C3y h; CC3x CC3y h]; %% Nodos del Clúster 3
AP=[N1C1x N1C1y h; N2C1x N2C1y h; CC1x CC1y h; N1C2x N1C2y h; N2C2x
N2C2y h; CC2x CC2y h; N1C3x N1C3y h; CC3x CC3y h; CP1x CP1y h; CP2x
CP2y h]; %% Matriz para graficar nodos
P=P';
P2=P2';
P3=P3';
AP=AP';

%% CLÚSTER 1
%% Parámetros de Radiofrecuencia %%
Pt=20; %[dBm] Potencia de transmisión
Gt=5; %[dBi] Ganacia de antena Tx
Gr=5; %[dBi] Ganacia de antena Rx
f=2445e6; %[Hz] Fc de Canal 16
Pnoise=-68; %[dBm] min -80, mean -72, max -68
plot3(AP(1,:),AP(2,:),AP(3,:), 'b^', 'MarkerSize',10, 'LineWidth',6)
%% Graficar los AP en el espacio
xlabel('x [m]'),ylabel('y [m]'),zlabel('z [m]'); grid on; hold on
%% Determinar las distancias %%
d=zeros(num_ap,num_ap);
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        d(i,j)=sqrt((P(1,i)-P(1,j)).^2+(P(2,i)-P(2,j)).^2+(P(3,i)-
P(3,j)).^2);
    end
end
%% Determinar pérdidas de propagación %%
%% Modelo de Espacio Libre + Weisberger
lambda=300000000/f
L=-
((20*(log10((4*pi*(d))/lambda)))+(1.33*((2.445)^0.284)*(18^0.588)))
%% Determinar Capacidad de Canal %%
Pr=Pt+Gt+Gr+L; %[dB]
S_N=Pr-Pnoise;
S_N_1=3;
S_N_2=6;
S_N_3=9;
S_N_4=12;
B=3e6; %% Factor de ensanchamiento por tec. DSSS
sp_f=8;
%% Velocidad de datos respecto al SNR obtenido %%

```

```

for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (i==j)
            CC(i,j)=0;
            %
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i) P(3,j)], '-
-r', 'LineWidth', 2.5), hold on
            elseif (S_N(i,j)>=3 && S_N(i,j)<6)
                CC(i,j)=250;
                plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i) P(3,j)], '-
-m', 'LineWidth', 2.5), hold on
            elseif (S_N(i,j)>=6 && S_N(i,j)<9)
                CC(i,j)=500;
                plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i) P(3,j)], '-
-g', 'LineWidth', 2.5), hold on
            elseif (S_N(i,j)>=9 && S_N(i,j)<12)
                CC(i,j)=1000;
                plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i) P(3,j)], '-
-k', 'LineWidth', 2.5), hold on
            elseif (S_N(i,j)>=12)
                CC(i,j)=2000;
                plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--b', 'LineWidth', 2.5), hold on
            else
                CC(i,j)=0;
            %
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--r', 'LineWidth', 1), hold on
            end
        end
    end
end
%% Capacidad de canal máxima %%
CC_2=(B/sp_f)*log2(1+10.^(S_N/10))/1e3;

CDF1=0; % Matriz de throughput
CDF2=0; % Matriz de Capacidad del Canal Máxima
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (CC(i,j)~=0)
            CDF1=[CDF1;CC(i,j)];
        end
    end
end
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (CC_2(i,j)~=0)
            CDF2=[CDF2;CC_2(i,j)];
        end
    end
end

%CLUSTER 2
%% Parámetros de Radiofrecuencia %%
Pt=20; %[dBm] Potencia de transmisión

```

```

Gt=5; %[dBi] Ganacia de antena Tx
Gr=5; %[dBi] Ganacia de antena Rx
f=2445e6; %[Hz] Fc de Canal 16
Pnoise=-68; %[dBm] min -80, mean -72, max -68
%% Determinar las distancias %%
d2=zeros(num_ap,num_ap);
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        d2(i,j)=sqrt((P2(1,i)-P2(1,j)).^2+(P2(2,i)-
P2(2,j)).^2+(P2(3,i)-P2(3,j)).^2);
    end
end
%% Determinar pérdidas de propagación %%
%% Modelo de Espacio Libre + Weisberger
lambda=300000000/f
L2=-
((20*(log10((4*pi*(d2))/lambda)))+(1.33*((2.445)^0.284)*(30^0.588)))
%% Determinar Capacidad de Canal %%
Pr2=Pt+Gt+Gr+L2; %[dB]
S_N2=Pr2-Pnoise;
S_N_1=3;
S_N_2=6;
S_N_3=9;
S_N_4=12;
B=3e6;
sp_f=8;
%% Velocidad de datos respecto al SNR obtenido %%
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (i==j)
            CC2(i,j)=0;
            %
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--r', 'LineWidth', 2.5), hold on
            elseif (S_N2(i,j)>=3 && S_N2(i,j)<6)
                CC2(i,j)=250;
                plot3([P2(1,i) P2(1,j)], [P2(2,i) P2(2,j)], [P2(3,i)
P2(3,j)], '--m', 'LineWidth', 2.5), hold on
            elseif (S_N2(i,j)>=6 && S_N2(i,j)<9)
                CC2(i,j)=500;
                plot3([P2(1,i) P2(1,j)], [P2(2,i) P2(2,j)], [P2(3,i)
P2(3,j)], '--g', 'LineWidth', 2.5), hold on
            elseif (S_N2(i,j)>=9 && S_N2(i,j)<12)
                CC2(i,j)=1000;
                plot3([P2(1,i) P2(1,j)], [P2(2,i) P2(2,j)], [P2(3,i)
P2(3,j)], '--k', 'LineWidth', 2.5), hold on
            elseif (S_N2(i,j)>=12)
                CC2(i,j)=2000;
                plot3([P2(1,i) P2(1,j)], [P2(2,i) P2(2,j)], [P2(3,i)
P2(3,j)], '--b', 'LineWidth', 2.5), hold on
            else
                CC2(i,j)=0;
            %
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--r', 'LineWidth', 1), hold on
        end
    end
end

```

```

    end
end
%% Capacidad de canal máxima %%
CC2_2=(B/sp_f)*log2(1+10.^(S_N2/10))/1e3;

CDF12=0; % Matriz de Throughput
CDF22=0; % Matriz de Capacidad del Canal Máxima
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (CC2(i,j)~=0)
            CDF12=[CDF12;CC2(i,j)];
        end
    end
end
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (CC2_2(i,j)~=0)
            CDF22=[CDF22;CC2_2(i,j)];
        end
    end
end

%CLUSTER 3
%% Matriz de posiciones %%
Pt=20; %[dBm] Potencia de transmisión
Gt=5; %[dBi] Ganacia de antena Tx
Gr=5; %[dBi] Ganacia de antena Rx
f=2445e6; %[Hz] Fc de Canal 16
Pnoise=-68; %[dBm] min -80, mean -72, max -68
%% Determinar las distancias %%
% dmax=6;
d3=zeros(num_ap-1,num_ap-1);
for i=1:num_ap-1
    for j=1:num_ap-1
        d3(i,j)=sqrt((P3(1,i)-P3(1,j)).^2+(P3(2,i)-
P3(2,j)).^2+(P3(3,i)-P3(3,j)).^2);
    end
end
%% Determinar p?rdidas de propagación %%
%% Modelo de Espacio Libre + Weisberger
lambda=300000000/f
L3=-
((20*(log10((4*pi*(d3))/lambda)))+(1.33*((2.445)^0.284)*(45^0.588)))
%% Determinar Capacidad de Canal %%
Pr3=Pt+Gt+Gr+L3; %[dB]
S_N3=Pr3-Pnoise;
S_N_1=3;
S_N_2=6;
S_N_3=9;
S_N_4=12;
B=3e6;
sp_f=8;

```

```

%% Velocidad de datos respecto al SNR obtenido %%
for i=1:num_ap-1
    for j=1:num_ap-1
        if (i==j)
            CC3(i,j)=0;
        %
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--r', 'LineWidth', 2.5), hold on
        elseif (S_N3(i,j)>=3 && S_N3(i,j)<6)
            CC3(i,j)=250;
            plot3([P3(1,i) P3(1,j)], [P3(2,i) P3(2,j)], [P3(3,i)
P3(3,j)], '--m', 'LineWidth', 2.5), hold on
        elseif (S_N3(i,j)>=6 && S_N3(i,j)<9)
            CC3(i,j)=500;
            plot3([P3(1,i) P3(1,j)], [P3(2,i) P3(2,j)], [P3(3,i)
P3(3,j)], '--g', 'LineWidth', 2.5), hold on
        elseif (S_N3(i,j)>=9 && S_N3(i,j)<12)
            CC3(i,j)=1000;
            plot3([P3(1,i) P3(1,j)], [P3(2,i) P3(2,j)], [P3(3,i)
P3(3,j)], '--k', 'LineWidth', 2.5), hold on
        elseif (S_N3(i,j)>=12)
            CC3(i,j)=2000;
            plot3([P3(1,i) P3(1,j)], [P3(2,i) P3(2,j)], [P3(3,i)
P3(3,j)], '--b', 'LineWidth', 2.5), hold on
        else
            CC3(i,j)=0;
        %
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--r', 'LineWidth', 1), hold on
        end
    end
end
%% Capacidad de canal máxima %%
CC3_2=(B/sp_f)*log2(1+10.^(S_N3/10))/1e3;

CDF13=0; % Matriz de Throughput
CDF23=0; % Matriz de Capacidad del Canal Máxima
for i=1:num_ap-1
    for j=1:num_ap-1
        if (CC3(i,j)~=0)
            CDF13=[CDF13;CC3(i,j)];
        end
    end
end
for i=1:num_ap-1
    for j=1:num_ap-1
        if (CC3_2(i,j)~=0)
            CDF23=[CDF23;CC3_2(i,j)];
        end
    end
end
end

```

Código Fuente para enlaces entre nodos coordinadores

El siguiente código simula los enlaces establecidos entre los dispositivos coordinadores de la red.

```
clear all,close all,clc
%% Determinación de puntos / coordenadas UTM %%
%% Se describe la posición de cada nodo (final y nodo
coordinador)descrito como NxCx, %%
%% donde "x" es el número del nodo y "y" el número del cluster. %%
%% Se simulan todos los enlaces entre dispositivos coordinadores %%
num_ap=5; % Número de dispositivos coordinadores
N1C1x = 621375.755309369;
N1C1y = 9767248.05115499;

N2C1x = 621367.152185033;
N2C1y = 9767315.92488512;

N1C2x = 621414.871613813;
N1C2y = 9767518.256;

N2C2x = 621449.124700558;
N2C2y = 9767461.41995909;

N1C3x = 621653.983284992;
N1C3y = 9767499.36037645;

CC1x = 621403.275901671;
CC1y = 9767283.04362863;

CC2x = 621459.660072202;
CC2y = 9767505.63329177;

CC3x = 621607.914711467;
CC3y = 9767448.7230732;

CP1x = 621453.066465343;
CP1y = 9767354.55786979;

CP2x = 621509.348469873;
CP2y = 9767431.28561664;

h = 10; %% altura de nodos %%
%% Matrices de posiciones %%
P=[CC1x CC1y h; CC2x CC2y h; CC3x CC3y h; CP1x CP1y h; CP2x CP2y h];
AP=[N1C1x N1C1y h; N2C1x N2C1y h; CC1x CC1y h; N1C2x N1C2y h; N2C2x
N2C2y h; CC2x CC2y h; N1C3x N1C3y h; CC3x CC3y h; CP1x CP1y h; CP2x
CP2y h]; %% Matriz para graficar nodos
P=P';
AP=AP';
```

```

%% Parámetros de Radiofrecuencia %%
Pt=18; %[dBm] Potencia de transmisión
Gt=5; %[dBi] Ganacia de antena Tx
Gr=5; %[dBi] Ganacia de antena Rx
f=2445e6; %[Hz] Fc de Canal 16
Pnoise=-68; %[dBm] min -80, mean -72, max -68
plot3(AP(1,:),AP(2,:),AP(3,:), 'b^','MarkerSize',10,'LineWidth',6)
%% Graficar los AP en el espacio
xlabel('x [m]'),ylabel('y [m]'),zlabel('z [m]'); grid on; hold on
%% Determinar las distancias %%
% dmax=6;
d=zeros(num_ap,num_ap);% el tamaño de esta matriz depende de la
cantidad de puntos que representen a los sensores.
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        d(i,j)=sqrt((P(1,i)-P(1,j)).^2+(P(2,i)-P(2,j)).^2+(P(3,i)-
P(3,j)).^2);
    end
end
%% Determinar pérdidas de propagación %%
%% Modelo de Espacio Libre + Weisberger
lambda=3000000000/f
L=-
((20*(log10((4*pi*(d))/lambda)))+(1.33*((2.445)^0.284)*(22^0.588)))
%% Determinar Capacidad de Canal %%
Pr=Pt+Gt+Gr+L; %[dB]
S_N=Pr-Pnoise;
S_N_1=3;
S_N_2=6;
S_N_3=9;
S_N_4=12;
B=3e6;
sp_f=8;
%% Velocidad de datos respecto al SNR obtenido %%
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (i==j)
            CC(i,j)=0;
            %
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--r','LineWidth',2.5), hold on
        elseif (S_N(i,j)>=3 && S_N(i,j)<6)
            CC(i,j)=250;
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i) P(3,j)], '-
-m','LineWidth',2.5), hold on
        elseif (S_N(i,j)>=6 && S_N(i,j)<9)
            CC(i,j)=500;
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i) P(3,j)], '-
-g','LineWidth',2.5), hold on
        elseif (S_N(i,j)>=9 && S_N(i,j)<12)
            CC(i,j)=1000;
            plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i) P(3,j)], '-
-k','LineWidth',2.5), hold on
        elseif (S_N(i,j)>=12)
            CC(i,j)=2000;

```

```

        plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--b', 'LineWidth', 2.5), hold on
    else
        CC(i,j)=0;
    %
        plot3([P(1,i) P(1,j)], [P(2,i) P(2,j)], [P(3,i)
P(3,j)], '--r', 'LineWidth', 1), hold on
    end
end
end
end
%% Capacidad de canal m?xima %%
CC_2=(B/sp_f)*log2(1+10.^(S_N/10))/1e3;

CDF1=0; % Matriz de Throughput
CDF2=0; % Matriz de Capacidad del Canal M?xima
SNRT=0; % Matriz de SNR
PRT1=0; % Matriz de Pr
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (CC(i,j)~=0)
            CDF1=[CDF1;CC(i,j)];
        end
    end
end
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (CC_2(i,j)~=0)
            CDF2=[CDF2;CC_2(i,j)];
        end
    end
end
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (S_N(i,j)~=0)
            SNRT=[SNRT;S_N(i,j)];
        end
    end
end
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (Pr(i,j)~=0)
            PRT1=[PRT1;Pr(i,j)];
        end
    end
end
end
end

```

ANEXO 2

En este Anexo se detalla la validación del código fuente.

Enlace: Nodo 1 Cluster 1 – Coordinador Cluster 1

Para el enlace en análisis se tiene que la distancia de separación entre los nodos es de 44.5180mts. Adicionalmente mediante la inspección en campo se determinó que el trayecto afectado por atenuación debida al follaje es de aproximadamente 18mts, de manera que reemplazando los datos en la ecuación (9) la pérdida de propagación queda de la siguiente manera:

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + 1.33F^{0.284} df^{0.588} \text{ (dB)} \quad (9)$$

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi(44.5180)}{0.1227} \right) + 1.33(2.445)^{0.284} 18^{0.588}$$

$$L = 73.1780 + 9.3804 = 82.5584 \text{ (dB)}$$

Una vez determinada la pérdida de propagación, se procederá a obtener la potencia recibida haciendo uso de la ecuación (5):

$$Prx = 20 + 5 + 5 - 82.5584$$

$$Prx = -52.5584 \text{ (dB)}$$

Para el cálculo del SNR se considerará el peor escenario, es decir con la mayor potencia de ruido afectando la señal de interés, como se lo describió en los parámetros de configuración para este caso se tendría un $P_{\text{noisemáx}} = -68\text{dBm}$.

$$\text{SNR} = -52.5584 - (-68)$$

$$\text{SNR} = 15.4415$$

Finalmente, se procederá a obtener la capacidad máxima del canal, mediante la ecuación de Shannon para canales con ruido. Reemplazando los valores en la ecuación (6), la capacidad máxima del canal queda de la siguiente manera:

$$\text{CC} = (3\text{MHz}/8) * \log_2 \left(1 + 10^{\left(\frac{15.4416}{10}\right)} \right) / 1000$$

$$\text{CC} = 1938.833 \text{ Kbps}$$

En la ecuación anterior se puede observar que el ancho de banda del canal se lo divide para un factor de 8, esto se debe a que para efectos del cálculo se requiere el ancho de banda de la señal mensaje, mas no el ancho de banda resultante producido por la técnica de espectro ensanchado DSSS.

Enlace: Nodo 1 Clúster 2 – Coordinador Clúster 2

Para el enlace en análisis se tiene que la distancia de separación entre los nodos es de 46.533mts. Adicionalmente mediante la inspección en campo se determinó que el trayecto afectado por atenuación debida al follaje es de aproximadamente 30mts, de manera que la pérdida de propagación queda de la siguiente manera:

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi(46.533)}{0.1227} \right) + 1.33(2.445)^{0.284} 30^{0.588}$$

$$L = 73.562 + 12.666 = 86.229 \text{ dB}$$

Luego obtenemos la potencia recibida, reemplazando los datos obtenidos en la ecuación (5):

$$Prx = 20 + 5 + 5 - 86.229$$

$$Prx = -56.229 \text{ dB}$$

De la misma manera se considerará un $P_{\text{noisemáx}} = -68\text{dBm}$, reemplazando los datos, la ecuación (6) queda de la siguiente manera:

$$SNR = -56.229 - (-68)$$

$$SNR = 11.771$$

Finalmente, se calculará la capacidad máxima del canal:

$$CC = (3\text{MHz}/8) * \log_2(1 + 15.0348)/1000$$

$$CC = 1501.178 \text{ Kbps}$$