



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DISEÑO DEL DESPLIEGUE DE REDES DE
SENSORES PARA PARQUEO INTELIGENTE EN LA
ZONA CÉNTRICA DE GUAYAQUIL”**

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**BANCHÓN LEÓN ESTEFANIA MICHELLE
MONCAYO PIONCE VIVIANA PAOLA**

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por darnos la fuerza y fe para creer lo que nos parecía imposible terminar.

Gracias a nuestros maestros por brindarnos sus conocimientos que nos han permitido llegar hasta aquí, a nuestro tutor Jorge Gómez, por sus consejos que han sido de suma importancia a lo largo de este proceso.

Gracias a nuestros compañeros, con los que hemos compartido grandes momentos y a todas las personas que nos apoyaron en la realización de este proyecto.

Estefania Banchón León.

Viviana Moncayo Pionce.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de manera especial a mi madre Martha, pues ella ha sido el pilar fundamental en mi vida, sentó en mí los valores de responsabilidad y deseos de superación; su gran corazón y virtudes infinitas que me llevan a admirarla cada día más.

A mi hermano Fernando, quién me ha brindado su apoyo constante y confianza en todo lo necesario, para así cumplir mis objetivos como persona y estudiante.

Estefania Banchón León.

Dedico a mis padres, que en todo momento han sabido inculcar en mí valores como persona y me han apoyado incondicionalmente en todo momento de mi vida.

A mi novio, que me ha ayudado y apoyado en mi carrera brindándome aliento y perseverancia para conseguir mis objetivos.

Viviana Moncayo Pionce.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Carlos Valdivieso A. Msc.

PROFESOR EVALUADOR

.....
César Yépez F. Msc.

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me(nos) corresponde exclusivamente; y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOLE 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"

.....
Estefania Banchón León

.....
Viviana Moncayo Pionce

RESUMEN

En la actualidad, el incremento del parque automotor en las grandes ciudades ha dado lugar a embotellamientos y disturbios en la vía pública, que a su vez provoca que el acceso a las zonas de estacionamientos se torne complicado. En base a esto, es importante optimizar los recursos que implica realizar esta búsqueda y demás inconvenientes tratados en el capítulo 2.

De ésta manera, el presente proyecto pretende hacer uso de las tecnologías de información y comunicación (TIC) para solucionar este problema. Para esto se realiza el diseño de una red, basado en la utilización de nodos que permitan la transferencia de datos de forma inalámbrica, para la monitorización y gestión de aparcamientos en la zona céntrica de la ciudad de Guayaquil.

En el capítulo 3 se describe la metodología a seguir para el desarrollo de este sistema, donde se definen los implementos y parámetros necesarios, tales como: el protocolo de comunicación Zigbee, la topología de tipo malla, el modelo de propagación para ambientes urbanos, la selección de la mota y gateway ideales para la detección de vehículos y transferencia de datos para parqueo inteligente.

Para el despliegue óptimo de la red es necesario conocer los puntos de ubicación de los nodos y realizar los cálculos respectivos para determinar la calidad del enlace entre ellos, por medio de una simulación en la plataforma Matlab haciendo uso del código del Anexo B y su respectiva validación en el Anexo C. Donde las pruebas corresponden a 3 tipos de escenarios con interferencias de ruido: alto, medio y bajo, que nos lleva a verificar si la posición y cantidad de nodos son satisfactorios para un correcto funcionamiento de la red.

Consecuentemente, en el capítulo 4 se realiza el análisis de los resultados haciendo uso de gráficos estadísticos que ayudan a describir en qué nivel de porcentaje los parámetros de SNR, velocidad de transmisión y capacidad de canal; afectan la conectividad entre las motas para cada uno de los escenarios descritos anteriormente, demostrando así la eficiencia del sistema.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
CAPÍTULO 1	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Problemática	2
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Metodología	5
1.6 Alcance	5
CAPÍTULO 2	6
2. ESTADO DE ARTE	6
2.1 Smart City	6
2.1.1 Modelo de una Smart City	7
2.1.2 Casos de Smart Cities en diferentes regiones	8
2.2 Redes de sensores inalámbricas	11
2.3 Protocolo de comunicaciones inalámbricas	12
2.3.1 Características del protocolo ZigBee	13
2.4 Proyectos y aplicaciones relacionadas en Smart Mobility	16
CAPÍTULO 3	18
3. DISEÑO DEL PROYECTO	18
3.1 Descripción del escenario	18
3.2 Metodología	19

3.3	Formulación matemática.....	21
3.4	Algoritmo de la simulación de la red.....	23
CAPÍTULO 4		25
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
4.1	Localización exacta del escenario	25
4.2	Selección de la mota.....	25
4.3	Selección del Gateway.....	30
4.4	Parámetros de configuración.....	31
4.5	Posiciones de los sensores	32
4.6	Resultados.....	34
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		42
BIBLIOGRAFÍA		43
ANEXOS.....		48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Cantidad de vehículos por cada cien mil habitantes en los países de América [3].	1
Figura 1.2: Vehículos detenidos por parquearse en zonas prohibidas [10].	3
Figura 2.1: Modelo de una Smart City [17].	7
Figura 2.2: Diseño de viviendas ecológicas en Paris [23].	10
Figura 2.3: Tipos de topología de ZigBee [31].	14
Figura 2.4: Zaanstad, prosumidor de energía [33].	16
Figura 2.5: Reciclar materia orgánica genera energía para la flota eléctrica [34].	17
Figura 2.6: Aplicación en donde se puede reservar los estacionamientos [33].	17
Figura 3.1: Congestionamiento vehicular en el centro de la ciudad de Guayaquil ...	18
Figura 3.2: Plazas de parqueo en la avenida 9 de octubre	19
Figura 3.3: Proceso de metodología	21
Figura 3.4: Diagrama de flujo del código de simulación de la red	24
Figura 4.1: Avenida 9 de Octubre	25
Figura 4.2: Vista Superior de la mota Waspnote	26
Figura 4.3: Diagrama de bloques y señales de datos del Waspnote [38].	28
Figura 4.4: Vista Superior de placa Smart Parking y sensor magnético	29
Figura 4.5: Encapsulado de la mota [39].	29
Figura 4.6: Diagrama interno de un nodo de estacionamiento [39].	30
Figura 4.7: Meshlium AP GW [40].	30
Figura 4.8: Potencias del Ruido del Canal 9	32
Figura 4.9: Ubicación de las motas en las plazas de parqueo	33
Figura 4.10: Ubicación de nodos sensores y repetidores en la Av. 9 de Octubre	34
Figura 4.11: Conexiones de la mota, Pnoise = -76.05dBm	35
Figura 4.12: Conexiones de la mota, cuando existe un Pnoise = -84.4dBm	35
Figura 4.13: Conexiones de la mota, cuando existe un Pnoise = -92.53dBm	36
Figura 4.14: Escenario de las motas con las repetidoras a Pnoise = -76.05dBm	37
Figura 4.15: Escenario de las motas con las repetidoras a Pnoise = -84.4dBm	37
Figura 4.16: Escenario de las motas con las repetidoras a Pnoise = -92.53dBm	38

Figura 4.17: Relación entre la señal y el ruido (SNR).....	39
Figura 4.18: Velocidad de trasmisión	40
Figura 4.19: Capacidad máxima de canal	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Modelo de una Smart City [18]	8
Tabla 2: Características del protocolo ZigBee [28].	13
Tabla 3: Ventajas y Desventajas de tipos de topologías [31].	15
Tabla 4 – Parte I: Smart Mobility en diferentes ciudades del mundo [35] [36].	16
Tabla 4 – Parte II: Smart Mobility en diferentes ciudades del mundo [35] [36].	17
Tabla 5: Especificaciones del Waspote [38].....	26
Tabla 6: Especificaciones de Xbee-ZB-PRO [41].	31
Tabla 7: Frecuencia que opera en la banda 2.4GHz [38].	31
Tabla 8: Tipos de escenarios para las potencias de ruido.....	32
Tabla 9: Parámetros de velocidad de transmisión con respecto al SNR [42].	34
Tabla 10: Probabilidad de que exista una mota aislada según la figura 4.17.	39
Tabla 11: Probabilidad de error en la cantidad de información que puede transportar el canal.	41

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

1.1 Antecedentes

Hoy en día los automóviles se han convertido en una necesidad tan básica para la sociedad, facilitando la movilización de las personas y disminuyendo el tiempo y esfuerzo que requieren para llegar a su destino. Estos representan uno de los medios de transportes más utilizados y con mayor demanda en las ciudades que poseen una alta densidad de población.

Se sabe que en Ecuador existe un aproximado de 2'200,000 vehículos con una tasa de crecimiento del 3.17% que circulan en las calles según la ANE (Agencia de Noticias de Ecuador) [1]. Las principales provincias con mayor afluencia vehicular son: Pichincha con un 33.63%; Guayas con un 22.57%; Azuay con un 7%; Tungurahua con un 5.42%; Manabí con un 5.34% y las restantes con un 22.87%. Estos porcentajes corresponden a un estudio realizado en los últimos diez años [2].

El aumento del sector automotriz es considerablemente superior en otros países de América según el Diario "El Siglo"; lo cual se puede observar en la figura 1.1, siendo Argentina el líder en la tenencia de vehículos.

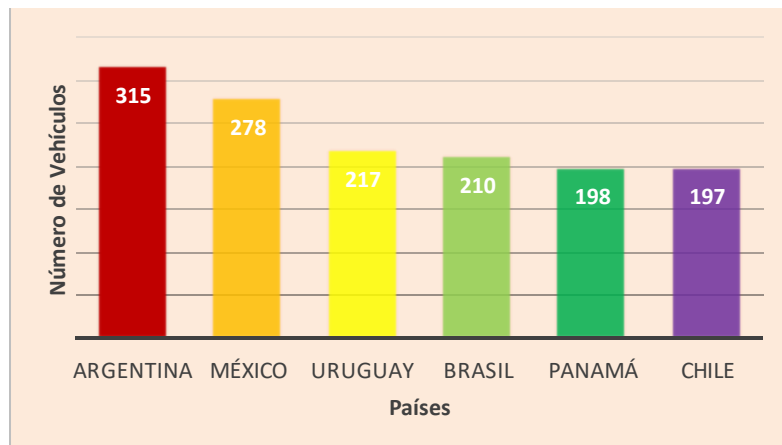


Figura 1.1: Cantidad de vehículos por cada cien mil habitantes en los países de América [3].

El exceso de automóviles genera un grave problema en la búsqueda de estacionamiento, principalmente en el casco comercial, provocando una gran concentración de tráfico, contratiempos y malestar en los ciudadanos [4].

1.2 Problemática

La conglomeración de vehículos en las calles dificulta el acceso a lugares de aparcamiento, teniendo como consecuencia:

- Retrasos de los empleados a los respectivos lugares de trabajo.
- Pérdida innecesaria de combustible, además de provocar mayor contaminación en el aire.
- Creación de doble columna en los estacionamientos.
- Pérdida de tiempo, frustración e incomodidad de los automovilistas [5].

Los efectos anteriormente mencionados aquejan de manera significativa a las grandes urbes de distintas partes del mundo.

Un claro ejemplo es Ciudad de México que se sitúa en segundo lugar con el peor tráfico del mundo, así mismo su mayor inconveniente se ve reflejado cuando la demanda excede el número de plazas de parqueo, ya que según la Comisión de Transporte de la ALDF (Asamblea Legislativa del Distrito Federal), actualmente existen 300 mil espacios para 4 millones de autos [6][7].

Dentro de las ciudades más visitadas en Estados Unidos se encuentran: San Francisco, Nueva York, Los Ángeles y Miami, las cuales presentan una alta densidad poblacional lo que supone un aumento en el tráfico vehicular, como consecuencia se implementó el uso de parquímetros, a pesar de que implica un gasto adicional para los usuarios, ya que pueden alcanzar los \$5 dólares por hora [8].

Ecuador no se encuentra exento de esta situación, siendo Guayaquil, Quito y Cuenca las ciudades con mayor concentración de tráfico.

En Quito, por ejemplo, más de 20,000 vehículos fueron multados por estacionarse en zonas prohibidas a causa del déficit de plazas como se observa en la figura 1.2, por este motivo se adoptó la medida de restricción llamada Pico y Placa que ayuda a controlar la circulación vehicular [9].



Figura 1.2: Vehículos detenidos por parquearse en zonas prohibidas [10].

Por otro lado, el parque automotor de la ciudad de Guayaquil posee una tasa de crecimiento que se encuentra entre el 10% y 15% anual, provocando incomodidad en los ciudadanos especialmente en las horas pico [11].

1.3 Justificación

El presente proyecto busca mejorar la situación que adolece nuestra sociedad a causa de la falta de aparcamiento; por tal motivo surge la necesidad de diseñar un sistema que permita conocer la disponibilidad de un espacio de parqueo, para esto es esencial el monitoreo y adquisición de datos en tiempo real que agilicen el proceso.

Esto se logra por medio de una red de sensores inalámbricos que constituyen un conjunto de dispositivos distribuidos físicamente, capaces de comunicar datos por medio de un enlace inalámbrico.

Es fundamental el uso de estos sensores ya que tienen la capacidad de detectar la presencia de un automóvil, además de ofrecer varias ventajas como: bajo consumo de potencia, cobertura, precios, precisión y seguridad [12].

Cabe destacar que el sistema se puede adaptar a diferentes infraestructuras y escenarios, tal es el caso de los siguientes sectores europeos que han adoptado este tipo de tecnología:

- Santander, norte de España, que cuenta con 400 sensores dedicados a controlar el espacio de parqueo, éstos con la ayuda de una aplicación de teléfono móvil y GPS permiten al usuario pagar el estacionamiento, además ofrecen la posibilidad de expandir el tiempo de uso [13].
- Niza, Francia, se implementó el mismo método de control y gestión con la aplicación móvil, además de forma paralela se colocaron sensores para el monitoreo de variantes relacionadas con el tráfico: contaminación, humedad y temperatura [14].

Por otro lado, América Latina ha adquirido mayor visibilidad en el desarrollo de ciudades inteligentes, de tal manera que existen muchos proyectos en vigencia con el mismo tipo de aplicación en transporte.

Consecuentemente, en Ecuador se han implementado parqueos inteligentes para el Centro Comercial Ñaquito (CCI) en Quito y el Malecón 2000 en Guayaquil que han demostrado su efectividad e importancia del sistema.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar una red de sensores inalámbricos para un parqueo inteligente en el centro de la ciudad de Guayaquil.

1.4.2 Objetivos específicos

- Revisar información sobre temas relacionados del proyecto integrador.
- Estudiar diferentes niveles de interferencia que existen en la zona céntrica de Guayaquil.
- Analizar y diseñar el tipo de sensor inalámbrico de acuerdo a las especificaciones y condiciones del lugar.
- Determinar la ubicación de los sensores en la zona.
- Realizar un diseño de red de sensores inalámbrico que tenga un buen rendimiento y sea escalable.
- Simular la red de sensores inalámbrica para comprobar su funcionamiento.

1.5 Metodología

El proyecto integrador constituye en analizar una serie de infraestructuras tecnológicas para llevar a cabo el funcionamiento del parqueo inteligente. La metodología que se realizará está dividida en dos aspectos importantes: investigativo y de diseño.

La parte investigativa consta en revisar y analizar fuentes de información relacionados al tema tales como: papers, publicaciones de revistas, libros y tesis que van a formar parte del estado del arte. Además, se va a recolectar datos de la zona céntrica de Guayaquil sobre la búsqueda de estacionamientos, la cantidad de plazas libres para los vehículos y una descripción del lugar donde se implementará el diseño.

La parte del diseño consta del análisis de las diferentes posibles tecnologías que podrían usarse para las redes de sensores inalámbricos que resulten eficientes, escalables y tenga tolerancia a fallos; esto conlleva a estudiar las diferentes interferencias que pueden existir en la zona; definir qué tipo de topología se usará para el diseño; determinar los tipo de sensores a utilizar; detallar la configuración de la puerta de enlace hacia la nube y como resultado final se desea que este diseño sea reutilizable para proyectos futuros.

1.6 Alcance

El proyecto tiene como base fundamental el monitoreo de plazas de parqueo, para lo cual será conveniente realizar la interacción con el usuario, por medio de una aplicación para dispositivos móviles que trabaje en conjunto a la plataforma Google Maps, desarrollando de ésta manera una herramienta de fácil acceso y disponible a cualquier hora del día.

El uso de paneles informativos que contribuyan a la visibilidad del estado de las zonas más cercanas, y la implementación de un sistema de alarma para indicar si un vehículo se encuentra mal estacionado o en una zona prohibida, son posibles temas a considerar si se cuenta con la ayuda de autoridad municipal.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DE ARTE.

Dada la problemática y la solución planteada en el capítulo anterior es necesario conocer los distintos conceptos que engloban el proyecto antes de proceder a realizar su diseño. Por tal motivo, la metodología que se va a utilizar en el presente capítulo es la investigativa, en la cual se analizan las diferentes temáticas como Ciudades Inteligentes (concepto, modelo, proyectos implementados), redes de sensores inalámbricas (características, arquitectura, mota del sensor, máscara, diferentes tecnologías inalámbricas estándares del sensor que se puede utilizar en Guayaquil) y ejemplos de proyectos actuales con respecto a la movilidad inteligente.

2.1 Smart City

El concepto de Smart City va de la mano con el “Internet de las Cosas”, ya que ambos tienen como misión principal crear un mundo digital en el que todo podrá estar conectado, logrando un crecimiento mediante el uso de las múltiples tecnologías de la información y la comunicación (TIC) [15], en los diferentes lugares de la ciudad, tales como: escuelas, hospitales, bibliotecas, museos, sistemas de transporte y otros servicios a la comunidad; para así poder mejorar la eficiencia de los diferentes servicios y satisfacer las distintas necesidades de los ciudadanos.

Las TIC son el eje principal de una Smart City que sirven para poder interconectar y mejorar la calidad de vida a través del uso de los diferentes sensores inteligentes con el fin de garantizar:

- Mejora en la comunicación entre el gobierno y los ciudadanos a través del uso de las diferentes aplicaciones con la meta de lograr transparencia, accesibilidad y eficiencia de los servicios urbanos.
- Reducir los costes y consumo de recursos utilizando redes de sensores inalámbricos.
- Puestos de control de monitoreo que sirven para responder rápidamente a los desafíos que se vive día a día.

- Paneles informativos en tiempo real, que aportan información a los ciudadanos sobre diferentes ámbitos de sus intereses como el tiempo de paso de los transportes públicos, tráfico, entre otros [16].

2.1.1 Modelo de una Smart City

Una ciudad inteligente comprende la tecnología, el gobierno y la sociedad que hace posible las siguientes características en la cual son clasificados en 6 ejes.



Figura 2.1: Modelo de una Smart City [17].

Es necesario primero analizar las características de la ciudad para obtener resultados razonables que brinde una buena cobertura de los distintos ejes del modelo planteado en la figura 2.1, ya que no todas las ciudades cumplen con los requisitos descritos en la tabla 1 para ser una Ciudad Inteligente.

Movilidad	• Eficacia en los usos de transporte
	• Accesibilidad nacional e internacional
	• Conexión e infraestructura de las TIC
	• Control y monitoreo del tráfico
Gobierno	• Ética en la política
	• Trámites online
	• Transparencia e eficacia en una administración
Vida	• Desarrollo de servicios médicos online
	• Brindar seguridad de vida
	• Perfeccionar la vivienda del ciudadano
	• Mejorar las zonas turísticas
Educación	• Actualización de la formación continua mediante diferentes medios
	• Brindar computadoras y tablets a profesores y alumnos para facilitar la educación
Entorno	• Reducir la contaminación del medio ambiente
	• Aumentar la conciencia ecológica
	• Gestionar los recursos reciclables
Economía	• Implantación de las TIC en las empresas para el crecimiento en el sector empresarial tanto nacional como internacionalmente
	• Incrementar el espíritu innovador
	• Mejorar la productividad mediante el uso de las TIC

Tabla 1: Modelo de una Smart City [18]

2.1.2 Casos de Smart Cities en diferentes regiones

Existen muchos países cuyo propósito es mejorar la calidad de vida urbana para los ciudadanos, conociendo sus debilidades y fortalezas en base al modelo que se muestra en la figura 2.1 para así identificar sus oportunidades y poder concluir que ciudades resulta viable al desarrollo del proyecto de una Ciudad Inteligente.

EUROPA

Europa es uno de los mejores modelos a seguir cuando se trata de ciudades inteligentes. Tienen una ciudadanía comprometida que juntos crean mayor sostenibilidad e inteligencia, demostrando obtener el mejor liderazgo de las ciudades del todo el mundo.

Las ciudades de Europa que están realizando las ideas más innovadoras para crear una Ciudad Inteligente son:

Copenhague: Es considerada como una de las capitales más verdes de Europa, ya que existe menor contaminación en el medio ambiente en comparación con otras ciudades. Como objetivo principal es lograr neutralidad de carbono para el año 2025 es decir eliminar por completo los gases contaminantes. Para llevar a cabo ese objetivo, tienen planeado [19]:

- Obtener eficacia energética usando recursos renovables, siendo una ciudad costera se aprovecha la energía eólica para reducir el uso de los combustibles fósiles.
- Mejorar y construir edificios sostenibles con cero emisiones de carbono y con el menor consumo de energía.
- Modernizar el sistema del alcantarillado para obtener la mejor calidad de agua, convirtiendo el puerto en azul.
- Reducir el tráfico mediante el uso de las bicicletas inteligentes, equipadas con sensores que brinden la información sobre la contaminación del aire y obtener un mayor acceso al tránsito; para llevar a cabo esta meta se tiene como compromiso utilizar el 40% de las bicicletas por parte de los ciudadanos para desplazarse de un lugar a otro.

Viena: Es identificada por tener la mejor calidad de vida para los ciudadanos, para lograr esa meta se ha realizado los siguientes proyectos:

- Más del 14% es de uso de energía renovable.
- Tiene las plantas de biomasa más grandes de Europa.

- Funcionamiento de la red de Citybike con 121 estaciones, el visitante podrá desplazarse en cualquier lugar pagando una tarifa con tarjeta de crédito en el terminal.
- Dispone de 104 estaciones para el metro, 29 líneas de tranvías y 115 autobuses; cada vez el transporte público asciende más para la mejor movilidad del ciudadano.
- Ofrece wifi gratuito disponibles en muchos lugares de la ciudad, publicando información sobre la ubicación en la siguiente página web.
- Aplicaciones que ofrece planificación de viajes, eventos destacados, tiendas entre otras.
- La mitad del área urbana de Viena está constituida por espacios verdes [20] y [21].

París: La capital francesa tiene como misión principal reducir el 75% de las emisiones de gases de carbono. Piensan convertirse en una ciudad inteligente para el año 2050, construyendo viviendas ecológicas que eliminen los gases de efecto invernadero, que tiene un diseño que mezcle la naturaleza con la arquitectura moderna como se ve en la figura 2.2 [22].



Figura 2.2: Diseño de viviendas ecológicas en París [23].

SUDAMÉRICA

Santiago: Ocupa el primer puesto en Latinoamérica como una Ciudad Inteligente, en la cual ha llevado a cabo los siguientes proyectos:

- Cuenta con 16 paneles solares fotovoltaicos como fuente de energía limpia en comparación con el petróleo que afecta y contamina al medio ambiente.
- Uso de tecnología solar para el calentamiento de agua sanitaria a través de colectores solares.
- Implementación de transportes eléctricos.
- Montaje de medidor inteligente de energía con comunicación bidireccional.
- Acceso público de wifi gratis [24].

México: Su principal funcionamiento es implementar una red inteligente de energía, en donde se acumulará la energía en las pilas por medio de la energía eólica y fotovoltaica en la iluminación pública.

- Tiene dos estrategias de movilidad, impulsar el uso de las bicicletas y compartimiento de vehículos es decir en un listado electrónico puesto en una página web se anota el lugar en donde vive y el horario de salida.
- Uso eficaz del agua, acumulando el agua por la lluvia para el riego de las plantas y en los servicios que no requiere agua potable [25].

2.2 Redes de sensores inalámbricas

Las redes de sensores inalámbricas están compuestas de pequeñas motas, equipadas de sensores que trabajan en una tarea en común y distribuidos en un área geográfica. Los dispositivos que se emplea en ésta red son capaces de procesar y recopilar información al realizar las mediciones y enviar datos a otras motas conectadas a la red.

Para convertirse en una ciudad inteligente es importante implementar las redes de sensores inalámbricas en la cual se han desarrollado varios proyectos en distintas áreas urbanas para lograr su crecimiento como: parqueo inteligente,

sistema de seguridad, supervisión al medio ambiente, monitoreo en la estructura de los edificios, entre otros.

2.2.1 Características

Las principales características de las redes de sensores inalámbricas son las siguientes:

- Ahorro de energía y de memoria, los dispositivos trabajan con pilas, con una larga vida de funcionamiento.
- Bajo costo.
- No requiere de infraestructura de red, las motas pueden actuar como emisores o receptores (router).
- Opera sin mantenimiento durante varios meses o años.
- Tolerancia a errores.
- Topología dinámica.
- Comunicación broadcast y multisalto.
- Variabilidad de canal [26].

2.3 Protocolo de comunicaciones inalámbricas

El uso de una red inalámbrica de área personal (WPAN) es ideal para la comunicación entre dispositivos inalámbricos personales en infraestructuras pequeñas. Para la optimización de recursos que ofrece este tipo de tecnología, se han desarrollado protocolos para cada aplicación.

ZigBee es un conjunto de protocolos de comunicación basado en el estándar IEEE 802.15.4 caracterizado principalmente por su bajo costo y consumo, esto se debe a la existencia de protocolos que controlan el período de transmisión y reposo de los dispositivos para el ahorro de energía; convirtiéndose en el más apropiado a usarse en este tipo de redes [27].

Es indispensable conocer las características y especificaciones que posee Zigbee (estándar IEEE 802.15.4) para su correcto uso en la implementación de una WSN (Red de Sensores Inalámbrica).

2.3.1 Características del protocolo ZigBee

En la tabla 2 se especifican los parámetros para las diferentes bandas en las que opera el protocolo:

Banda	868 MHz	915 MHz	2.4 GHz
Disponibilidad	Europa	América	Todo el mundo
Número de Canales	1	10	16
Rango de Frecuencia	868 - 868.6 MHz	902 - 928 MHz	2.4 - 2.48 GHz
Tasa de Bits	20 Kbps	40 Kbps	250 Kbps
Tasa de Símbolos	20 Ksps	40 Ksps	62.5 Ksps
Sensibilidad	-92 dBm	-92 dBm	-85 dBm
Modulación	BPSK	BPSK	OQPSK
Potencia	1mW	1mW	1mW
Rango de Transmisión	10 - 75m	10 - 75m	10 - 75m

Tabla 2: Características del protocolo ZigBee [28].

➤ Tipos de nodos

Se definen 3 tipos de nodos para ZigBee en la red:

- **Coordinador:** Es el nodo principal de la red que se encarga del control y gestión de la comunicación entre sensores.
- **Router:** Se encarga de ampliar la red y dirigir la información entre los dispositivos finales y el coordinador.
- **Final:** Su función principal es adquirir la información de su entorno, además este no podrá compartir datos con otros dispositivos finales solo con un router o coordinador [29].

➤ **Tipos de nodos según su funcionalidad de hardware**

Se clasifican en 2 tipos de dispositivos:

- **FFD (Full Function Devices):** Aquellos que se conectan con otras redes y por lo general poseen mayor memoria y capacidad en comparación a los RFD.
- **RFD (Reduced Function Devices):** Aquellos con menor capacidad y memoria, su principal función es el monitoreo y adquisición de datos, sólo puede actuar como dispositivo final [30].

➤ **Tipos de topologías**

Existen 3 tipos de topologías dentro del protocolo ZigBee: Árbol, Estrella y Malla, cuya configuración es mostrada en la figura 2.3, siendo el tipo malla la más utilizada por su confiabilidad.

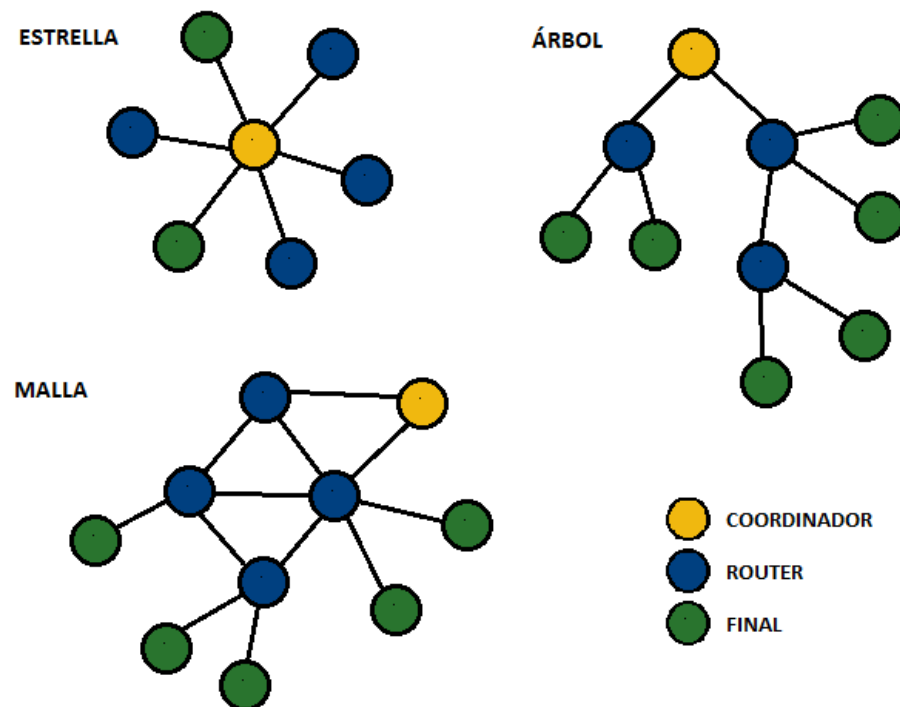


Figura 2.3: Tipos de topología de ZigBee [31].

En la tabla 3 se especifican las ventajas y desventajas que implica la implementación de cada tipo de topología:

TOPOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Estrella	Fácil implementación	Número limitado de nodos conectados a la red
	La falla de un nodo no afecta al resto de la red	La falla del nodo coordinador ocasiona la caída de la red
	No existen colisiones de datos.	Poco fiable en la transmisión de información
Árbol	La falla de un nodo no interrumpe la comunicación	Todas las estaciones reciben los datos sin importar a quién está dirigido
	Comparte el mismo canal de comunicación	Interferencias en la transmisión por el uso de canal compartido
Malla	La falla de un nodo no ocasiona la caída de la red	Alto costo de instalación
	Los datos se transmiten por varios caminos	Requiere muchos recursos

Tabla 3: Ventajas y Desventajas de tipos de topologías [31].

➤ **Tipos de Tráfico de Datos**

- **Datos periódicos:** Define que cada cierta cantidad de tiempo el sensor adquiera los datos para poder llevar un monitoreo constante del parámetro de medición.
- **Datos intermitentes:** Define el envío o recepción de información, siempre y cuando exista una señal externa que active el sensor, como por ejemplo el uso de un conmutador, lo que hace posible la optimización de la energía [32].

2.4 Proyectos y aplicaciones relacionadas en Smart Mobility

Actualmente más de la mitad de la población vive en zonas urbanas, cifra que sigue aumentando con el tiempo, por ende es necesario adoptar un sistema Smart City el cual ofrece grandes ventajas, especialmente en la gestión inteligente de parqueos, vehículos eléctricos entre otros para agilizar la movilización de los ciudadanos.

Por consiguiente, se procede a presentar en la tabla 4 algunos de los proyectos y aplicaciones que se encuentran en vigencia en diferentes partes del mundo.


Smart Mobility		
Area de Trabajo	Ciudad	Descripción
Transporte eficiente	Ámsterdam	<p>Zaanstad, tecnología innovadora para una movilidad limpia, utiliza energía renovable para cubrir el consumo de los vehículos eléctricos como se aprecia en la figura 2.4.</p>  <p>Figura 2.4: Zaanstad, prosumidor de energía [33].</p>
	Tokio	Cuenta con varios medios de transporte, tales como: tren, autobús, mono carriles y transbordadores. Cada uno de estos medios de transporte tienen una planificación inteligente que hace de cada recorrido, una maravillosa experiencia
	Bogotá	<p>EasyWay, es una red social donde las personas que tienen carro comparten su ruta con la comunidad en forma rápida, segura, económica y amigable con el medio ambiente</p> <p>Redes de ciclo vías en donde se realiza 450.000 viajes diarios en bicicletas</p>

Tabla 4 – Parte I: Smart Mobility en diferentes ciudades del mundo [35] [36].


Smart Mobility		
Area de Trabajo	Ciudad	Descripción
Transporte eficiente	Barcelona	<p>Separar bien los restos orgánicos brinda la oportunidad de ahorro, en la cual 1kg de materia orgánica reciclada genera 0.75kWh, quiere decir que un carro eléctrico podrá desplazarse 5km como se ve en la figura 2.5.</p>  <p>Figura 2.5: Reciclar materia orgánica genera energía para la flota eléctrica [34].</p>
Acceso multimodal	Seúl	<p>Servicio de búsqueda de una ruta óptima que utilice varios medios de transporte, como el vehículo privado, el autobús y el metro.</p>
Infraestructura Tecnológica	Ámsterdam	<p>Desarrollar un Smart Parking en donde el usuario podrá reservar la plaza de parqueo pública o privada con tiempo por medio de una aplicación, así como en la figura 2.6.</p>  <p>Figura 2.6: Aplicación en donde se puede reservar los estacionamientos [33].</p>

Tabla 4 – Parte II: Smart Mobility en diferentes ciudades del mundo [35] [36].

La Movilidad Inteligente constituye un elemento fundamental de la Smart City desde su planteamiento inicial. Resulta clave para hacer frente a la necesaria reducción de emisiones y el ahorro energético, a la congestión en las ciudades, así como a los problemas sociales y económicos asociados a la accesibilidad y la conectividad.

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DEL PROYECTO.

En este capítulo se procederá a elegir la mejor opción para el diseño de la red abarcando diferentes tópicos, tales como: la descripción del escenario, metodología (software), formulación matemática (modelo de propagación, capacidad del canal, SNR) y algoritmo del código de simulación de la red.

3.1 Descripción del escenario

El proyecto se centra en una gran avenida, siendo ésta la arteria principal de circulación del centro comercial de la ciudad de Guayaquil, caracterizada por la gran cantidad de edificios y locales comerciales alrededor donde se realizan actividades diariamente, ésta se ve mayormente afectada en horas pico por una alta congruencia de vehículos que circulan con dificultad por las calles congestionadas, tal como se muestra en la figura 3.1. El alumbrado eléctrico en esta zona es subterráneo, además como se observa en la figura 3.2 existe poca densidad de árboles y lugares para estacionar en ambos lados de la calle a lo largo de la avenida.

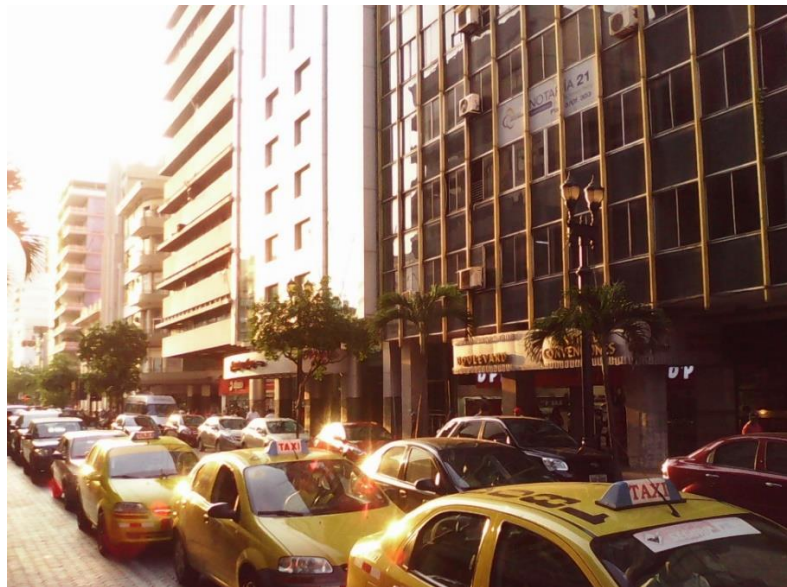


Figura 3.1: Congestionamiento vehicular en el centro de la ciudad de Guayaquil



Figura 3.2: Plazas de parqueo en la avenida 9 de octubre

3.2 Metodología

Para la realización de este proyecto es necesario conocer la metodología a seguir, de ésta manera se detallan aquellos programas y parámetros que posibilitan el diseño de la red.

El escenario tal como se mencionó anteriormente se realizará en una gran avenida en el centro de la ciudad de Guayaquil.

Por lo tanto, hay que considerar los puntos donde se ubicarán las motas, para esto el uso del GPS resulta insatisfactorio, ya que la presencia de varios edificios a lo largo de la avenida, provoca dificultades para posicionar los puntos y una menor precisión en los datos; en este caso se hará uso de la herramienta Google Earth para la toma de coordenadas geográficas.

Se llevará a cabo el monitoreo constante de la presencia de vehículos en las respectivas plazas; ya que en esta zona es inevitable el paso de peatones, el sensor a utilizar deberá ocuparse únicamente de la detección de automóviles, por tal motivo dentro de los distintos tipos de sensores de proximidad el más apropiado para este caso será el magnético.

Cabe recalcar que en este escenario la presencia de una o más motocicletas aparcadas en una plaza será considerada como un automóvil y bastará para indicar que el lugar se encuentra ocupado.

Consecuentemente, para el diseño de la mota se deben tomar en cuenta las características del escenario y condiciones ambientales que éste presenta, además de su compatibilidad con el tipo de sensor que cumpla las especificaciones anteriormente mencionadas; por este motivo el modelo de mota escogido es el Wasp mote que ha demostrado su alta fiabilidad en el campo de las ciudades inteligentes.

En base a las condiciones del entorno, las pérdidas de potencia se analizarán con el modelo de propagación de la Recomendación UIT-R P.1411-6, el cual es capaz de trabajar en zonas urbanas y en la frecuencia de 2.45 GHz. A partir del modelo de propagación se podrá determinar el respectivo presupuesto de enlace, SNR, capacidad de canal, entre otros datos necesarios que establecerán el desarrollo de la red.

Para una mejor visualización del diseño de la red se procederá a realizar una simulación por medio del software Matlab conforme a un código basado en el modelo de propagación escogido. Las gráficas resultantes como tal, exponen la interconexión entre los nodos finales y repetidores para diferentes tipos de escenarios, esto permite definir la calidad del enlace y el tipo de topología a usar.

De ésta manera se emplea la topología de tipo Mesh Multihop o también conocida como malla multisalto, la cual permitirá la comunicación punto a punto entre los nodos.

Finalmente, el conjunto de datos adquiridos por toda la red debe ser dirigido o enviado hacia el internet configurando una puerta de enlace (Gateway), para que los usuarios puedan hacer uso de esta información en tiempo real, todo este proceso se lo puede resumir en la figura 3.3.

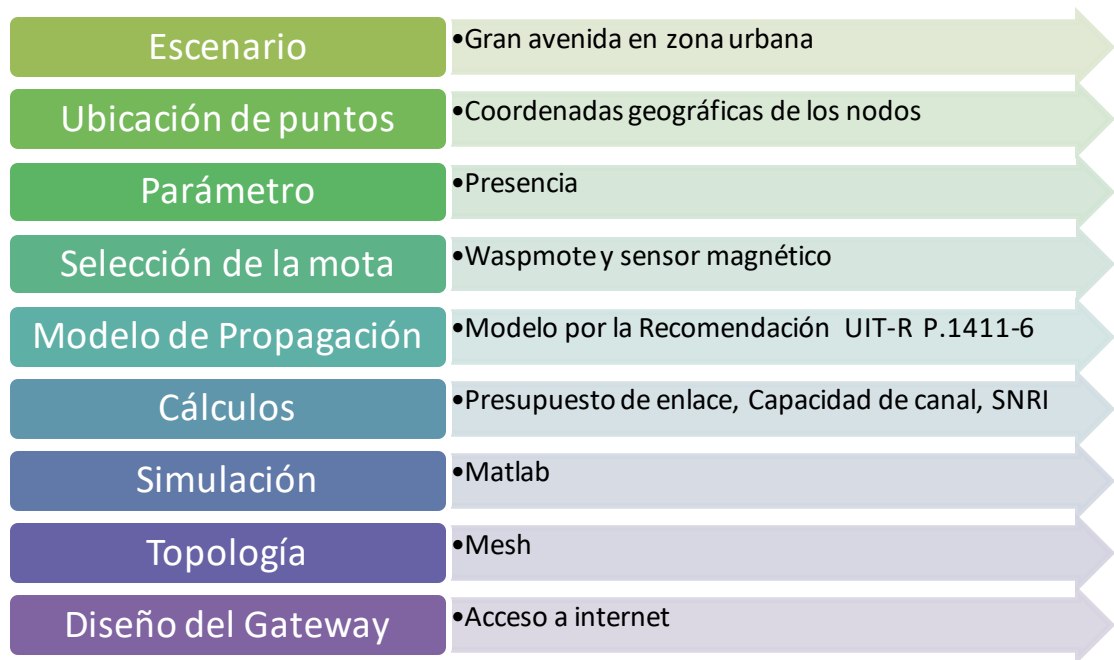


Figura 3.3: Proceso de metodología

3.3 Formulación matemática

Modelo de Pérdida de Propagación por la Recomendación UIT-R P.1411-6.

Este modelo es ideal para analizar el diseño del despliegue de redes de sensores para parqueo inteligente en la zona céntrica de Guayaquil porque proporciona directrices para la propagación de corto enlace en exteriores y trabaja con la gama de frecuencia desde 300MHz hasta 100GHz; tomando en cuenta las pérdidas que existe por los edificios, características de polarización y desvanecimiento, modelo multitrayecto por la propagación en las calles [37].

Pérdida de Propagación:

$$L_{LoS} = L_{bp} + 20 + L_{absorption} + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad [dB] \quad (3.1)$$

Donde:

R_{bp} : Es la distancia al punto de inflexión que viene dada por:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} [m] \quad (3.2)$$

$L_{absorption}$: Pérdida por absorción en medio exterior con edificios [dB]

L_{bp} : Es el valor de las pérdidas básicas de transmisión en el punto de inflexión que se define por:

$$L_{bp} = \left| 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m} \right) \right| [dB] \quad (3.3)$$

h_b : Altura de la antena de la EB [m]

h_m : Altura de la antena de la EM [m]

d : Distancia desde la EB a la EM. [m]

λ : Longitud de onda [m]

Potencia del receptor:

$$P_r = G_b + G_m + P_t + L [dBm] \quad (3.4)$$

Donde:

G_b : Ganancia de la antena de la EB [dBi]

G_m : Ganancia de la antena de la EM [dBi]

P_t : Potencia del transmisor [dBm]

Relación Señal y Ruido:

$$S / N_{dB} = P_r - P_{noise} [dB] \quad (3.5)$$

Donde:

P_{noise} : Potencia del Ruido [dB]

Capacidad máxima del canal:

$$C = \frac{B}{8} * \frac{\log_2(1 + 10^{\frac{SNR}{10}})}{1 \times 10^3} \quad [bps] \quad (3.6)$$

Donde:

B : Ancho del canal

SNR : Relación Señal y Ruido [Watts]

3.4 Algoritmo de la simulación de la red

El proceso en el que se desarrolla el código ejecutado en Matlab, para la visualización del enlace entre nodos, mostrado en la figura 3.4 se especifica a continuación:

- Ingresar el número total de motas a utilizar y las coordenadas geográficas previamente obtenidas en Google Earth.
- Ingresar los parámetros de: potencia de transmisión, ganancia del transmisor y receptor, la frecuencia y potencia de ruido.
- Graficar las motas con su respectiva ubicación dentro del escenario.
- Calcular las distancias entre las motas.
- Calcular las pérdidas de propagación con los parámetros del modelo de propagación establecido (Recomendación UIT-R P.1411-6).
- Hallar la relación señal vs ruido (SNR).
- Determinar la capacidad de canal.
- Calcular la velocidad de transmisión de datos con respecto al SNR obtenido anteriormente y realizar la gráfica de enlace entre todas las motas.
- Determinar la capacidad de canal máxima.
- Se visualiza en el escenario todas las motas y la interconexión entre ellas.
- Comprobar que existe comunicación entre todos los nodos.
- Si existe; se finaliza el proceso ya que se habrá conseguido realizar un correcto funcionamiento de la red.

- Si no existe; se procede a reubicar y aumentar el número de motas que actúen como nodos repetidores y realizar el proceso nuevamente.

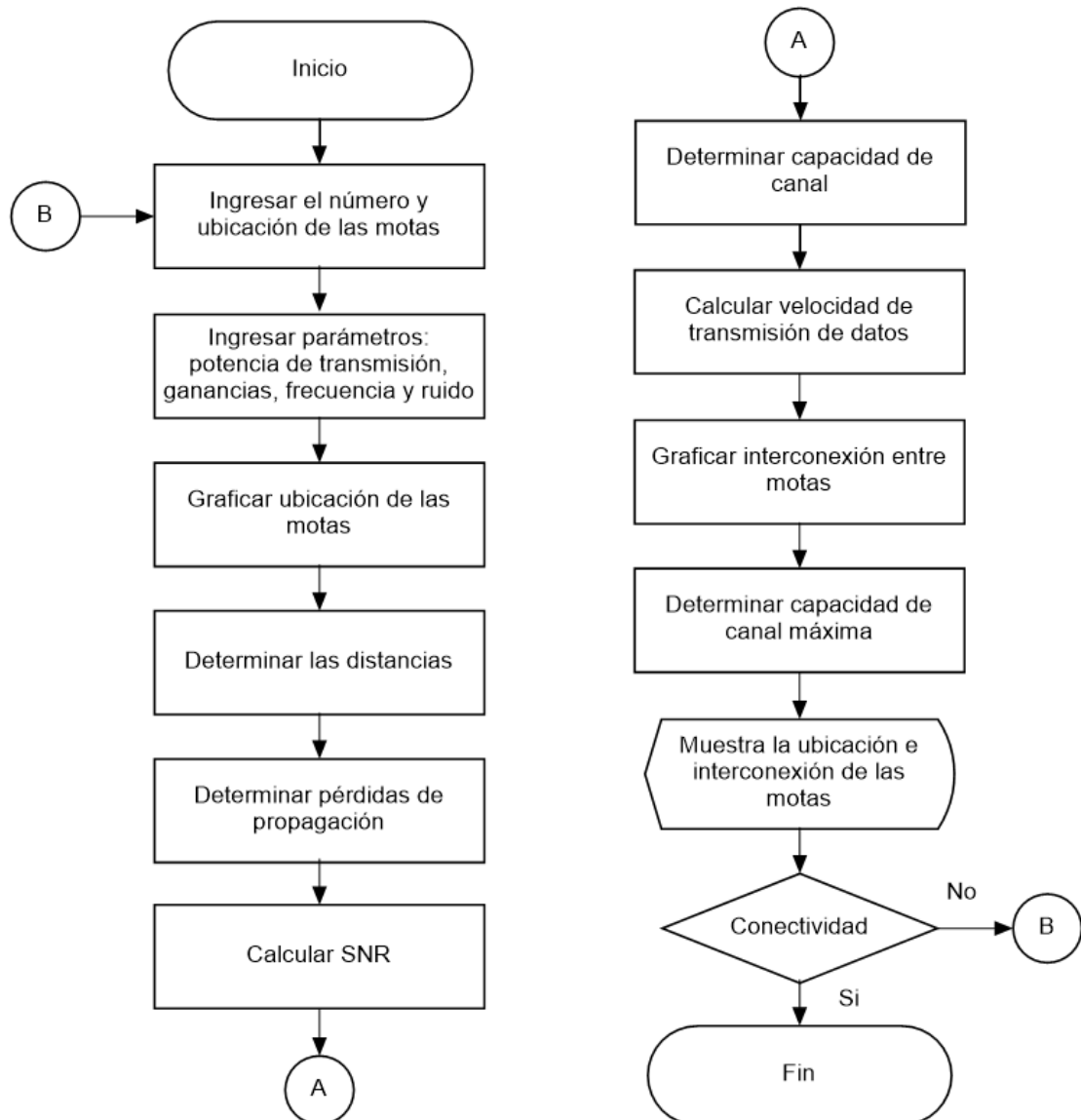


Figura 3.4: Diagrama de flujo del código de simulación de la red

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Localización exacta del escenario

En la ciudad de Guayaquil, el parque automotor se incrementa precipitadamente dando lugar a embotellamientos y disturbios en varias zonas de la localidad. El área central como tal, es donde se efectúan la mayor parte de las actividades, por lo tanto, el punto de estudio para este proyecto se sitúa en la avenida 9 de octubre, sector turístico que posee mayor afluencia vehicular. Las calles que delimitarán la zona en cuestión serán desde Chimborazo hasta el Malecón 2000, tal como se muestra en la figura 4.1, con un área de 17m de ancho y 400m de largo, además cada espacio de estacionamiento posee un área de 2x6m aproximadamente.

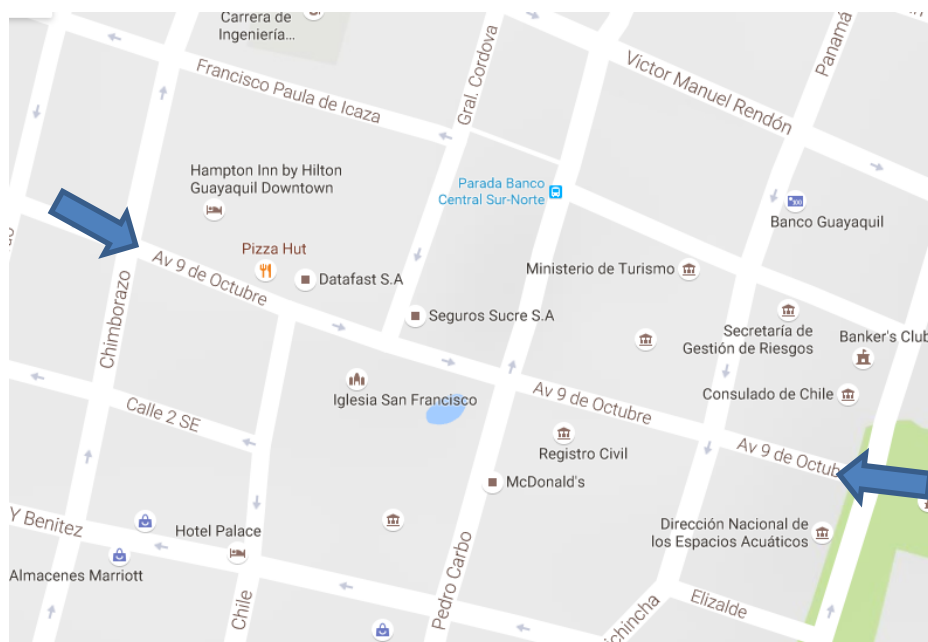


Figura 4.1: Avenida 9 de Octubre

4.2 Selección de la mota

Para la selección de la mota se deben tomar en cuenta las limitaciones u obstáculos que el escenario presenta, tales como: las condiciones ambientales y ubicación geográfica. En base a esto el modelo de mota de la figura 4.2, con el

que se trabajará es el Wasp mote de la empresa Libelium considerando varias de sus características como potencia de transmisión, alcance, sensibilidad, y demás, mostradas en la tabla 5.

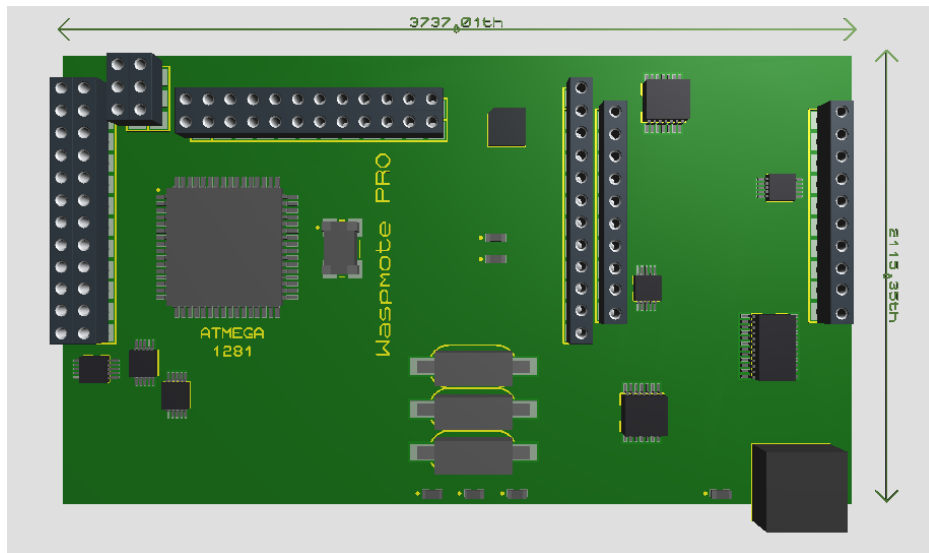


Figura 4.2: Vista Superior de la mote Wasp mote

ESPECIFICACIONES	
Microcontrolador	ATmega1281
Frecuencia	14.7456 MHz
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
FLASH	128KB
SD Card	2GB
Peso	20gr
Rango de Temperatura	[-10°C, +65°C]

Tabla 5: Especificaciones del Wasp mote [38].

Las señales de datos que conforman al Waspote que se observan en la figura 4.3 se describen a continuación:

- **Analógico:** Posee 7 pines para entradas analógicas conectadas directamente al microcontrolador. Trabajan con un rango de valores de voltaje de 0 V a 3.3 V.
- **Digital:** Sus 8 pines son configurables como entrada o salida, donde el valor lógico para 0 V es 0, así como el valor lógico para 3.3 V es 1.
- **UART:** Posee dos UART:
UART0 el cual posee el puerto USB y el Socket 0, este último es donde se colocan todos los módulos de comunicación inalámbrica como: XBee, Bluetooth, Wifi, entre otros.
Por otro lado, UART1 se encuentra conectado a un multiplexor de 4 canales: Socket1, 2 canales de SPI y GPS; para esto su configuración se encargará de indicar a que canal podrá acceder.
- **SPI:** Es el encargado de establecer la comunicación del microcontrolador con la tarjeta micro SD, además de conectarse al Socket1 y trabajar en los canales SPI de UART1.
- **USB:** Hace posible la comunicación del Waspote y otros dispositivos, por este medio se realiza la carga del programa en el microcontrolador, para esto el circuito integrado FT232RL será el encargado de la conversión de serial a USB.
- **RTC:** Trabaja con el integrado DS3231SN que opera a 32.768 Hz, permite al Waspote llevar la información en tiempo real y controla la activación del dispositivo cuando éste se encuentre dormido y sea necesario.
- **Acelerómetro:** Utiliza el integrado LIS3331LDH para la detección de cambios de aceleración en los 3 ejes (x, y,z) con tasas de transmisión de datos desde 0.5Hz hasta 1 KHz. Es capaz de trabajar en dos tipos de escenarios: si existe un cambio de dirección o caída libre a su vez realizará la acción que se le haya configurado.
- **I2C:** Es un bus de comunicación por el cual el acelerómetro y el RTC trabajan de forma paralela, detectando los cambios de aceleración en tiempo real.

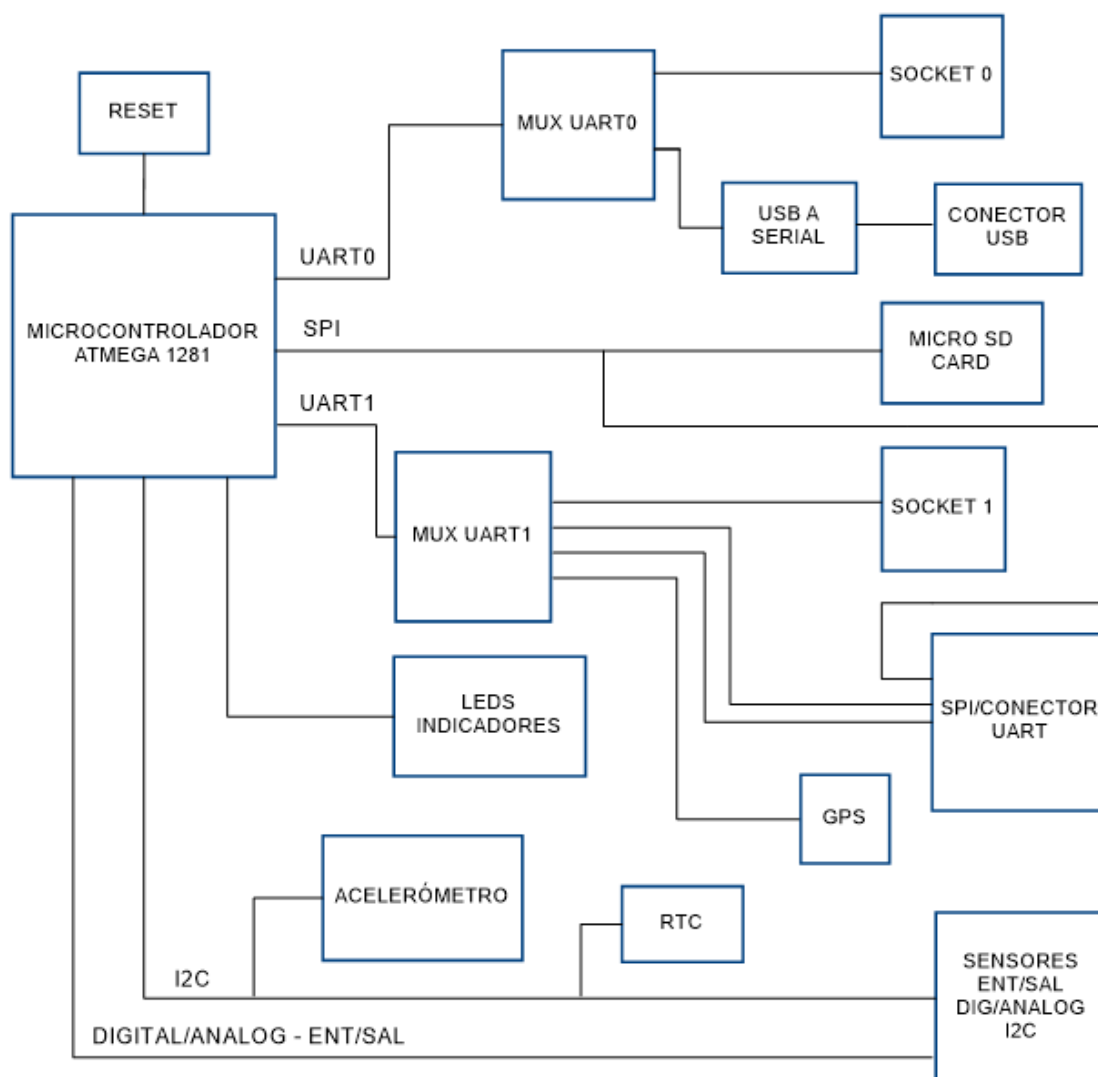


Figura 4.3: Diagrama de bloques y señales de datos del Waspote [38].

Existen 3 formas de alimentar al Waspote: baterías, panel solar y USB. Debido a que las motas (nodos sensores) serán encapsuladas e instaladas a ras del suelo, la mejor solución para su fuente de alimentación es el uso de baterías de ión de litio con capacidad de 26Ah, dado que tienen una duración de hasta 5 años aproximadamente, esto representaría un tiempo considerable en el que se podrá realizar el cambio de baterías correspondiente. Por otro lado, los nodos repetidores al ser ubicados en un punto sin conexión eléctrica su alimentación se dará por medio de panel solar.

Libelium facilita distintas placas de sensores para campos de trabajo específicos, en este caso se adquirirá la placa “smart parking”, la cual posee sensores de temperatura y magnético, tal como se muestra en la figura 4.4.

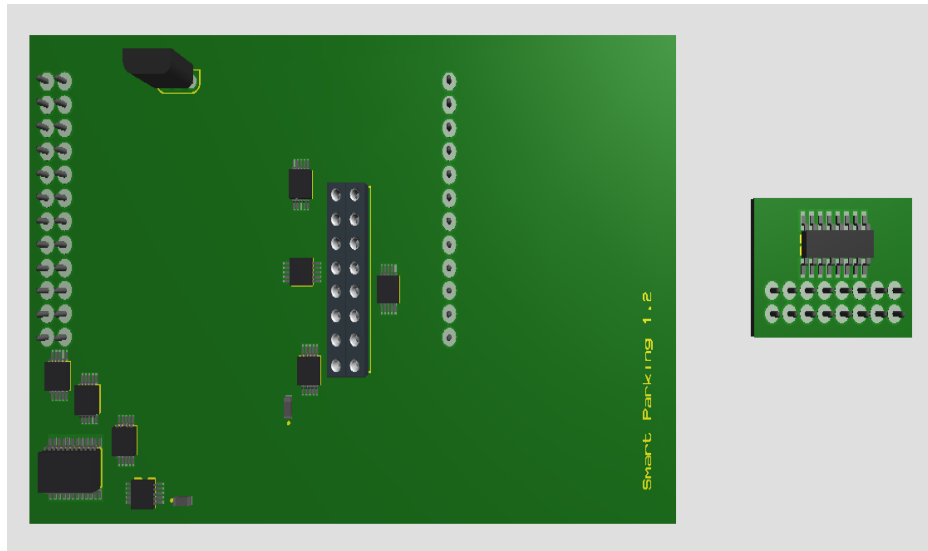


Figura 4.4: Vista Superior de placa Smart Parking y sensor magnético.

Además, se incorporará un módulo XBee–ZB-PRO que emplea el protocolo Zigbee y puede sincronizarse a sí mismo después del modo dormido para trabajar al mismo tiempo que los otros nodos que han estado permanentemente activados.

El encapsulado de las motas mostrado en la figura 4.5, se ubicará en un agujero previamente realizado en el pavimento, mismo que se encuentra integrado por todos los elementos anteriormente descritos, que se observan en la figura 4.6.



Figura 4.5: Encapsulado de la mota[39].

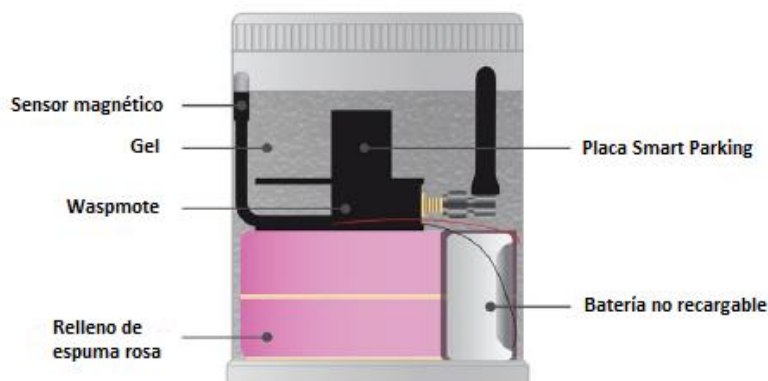


Figura 4.6: Diagrama interno de un nodo de estacionamiento [39].

4.3 Selección del Gateway

En la figura 4.7 se muestra el dispositivo Meshlium de la misma empresa Libelium que trabajará como el Gateway, es decir, la puerta de enlace que permitirá conectarse a otras redes de sensores y a su vez obtener un punto de acceso en común hacia el internet.



Figura 4.7: Meshlium AP GW [40].

La transmisión de información a los demás nodos se realiza por vía inalámbrica, recibiendo tramas de la interfaz configurada, en este caso Xbee que trabaja con el protocolo Zigbee del estándar IEEE 802.15.4, además se podrá hacer uso de un módulo GPS para aplicaciones móviles ya que trabaja al aire libre, además de poder alimentarse por medio de baterías y energía solar [40].

4.4 Parámetros de configuración

Los parámetros de entrada para la ejecución del código en Matlab se basan en las especificaciones del módulo Xbee-Zb-PRO mostradas en la tabla 6.

Descripción	XBee-ZB-PRO
Potencia del transmisor	17 dBm
Ganancia de la antena Tx	5dBi
Pérdida de los conectores	-1dB
Ganancia de la antena Rx	5dBi
Pérdida de los conectores	-1dB
Ganancia total	28dB
Pérdida de espacio libre	-100dB
Nivel de señal esperada	-72dB
Sensibilidad del receptor	-100dBm
Margen de enlace	28dB

Tabla 6: Especificaciones de Xbee-ZB-PRO [41].

Por otro lado, Zigbee define 16 canales para la banda de 2,4GHz, de los cuales 12 de ellos están disponibles para esta versión de hardware de libelium.

La frecuencia en la que se trabajará será de 2.45GHz, la cual se encuentra en el canal 9 como se observa en la tabla 7.

Número de Canal	Frecuencia
1	2.405 – 2.410 GHz
2	2.410 – 2.415 GHz
3	2.415 – 2.420 GHz
4	2.420 – 2.425 GHz
5	2.425 – 2.430 GHz
6	2.430 – 2.435 GHz
7	2.435 – 2.440 GHz
8	2.440 – 2.445 GHz
9	2.445 – 2.450 GHz
10	2.450 – 2.455 GHz
11	2.455 – 2.460 GHz
12	2.460 – 2.465 GHz

Tabla 7: Frecuencia que opera en la banda 2.4GHz [38].

Mediante un análisis del espectro de la banda de 2.4GHz, para verificar la disponibilidad de los canales y evitar la saturación, se considerarán 3 tipos de escenarios especificados en la tabla 8, para las potencias de ruido que presenta el canal, como se muestra en la figura 4.8.

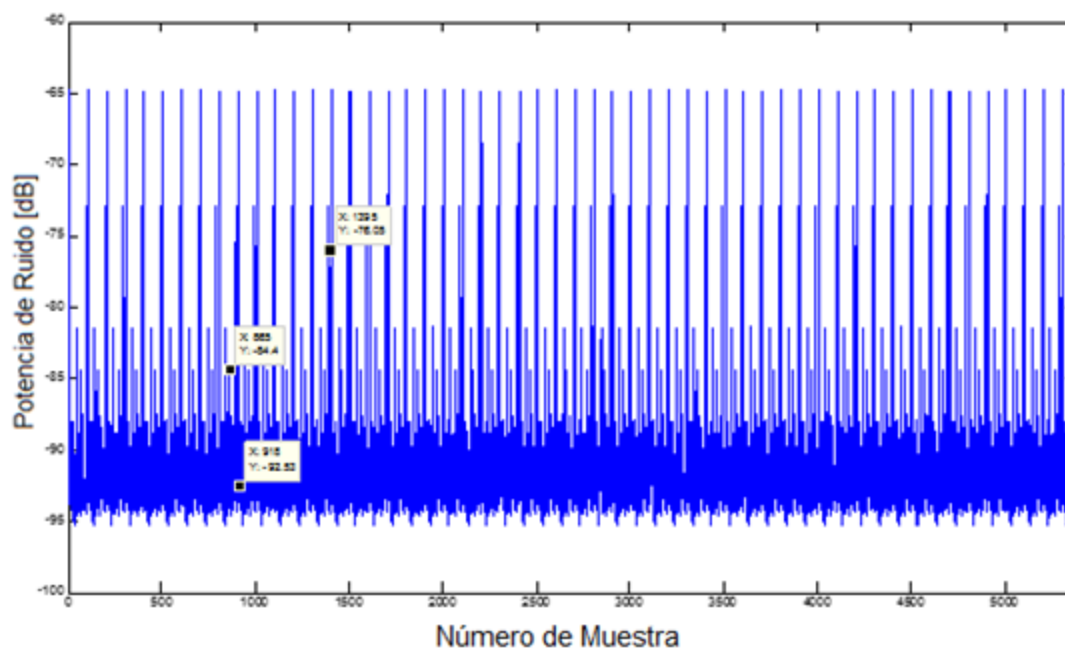


Figura 4.8: Potencias del Ruido del Canal 9

Escenario	Nivel de ruido	Potencia de ruido
1	Alto	76.5 dBm
2	Intermedio	-84.4 dBm
3	Bajo	-92.53 dBm

Tabla 8: Tipos de escenarios para las potencias de ruido

4.5 Posiciones de los sensores

El punto de despliegue óptimo de la mota dependerá del tipo de aparcamiento que se va a monitorear. En este caso la mota se colocará en el punto medio contiguo a la vereda de la plaza tal como se muestra en la figura 4.9, y así asegurar que solo detecte al vehículo estacionado en ese lugar prescindiendo de los que están a su alrededor. Esta precisión es de mayor importancia en aquellos

lugares donde caben 2 o más vehículos, ya que la distancia entre las motas es más corta y pueden llegar a influir en la detección de espacios vecinos.

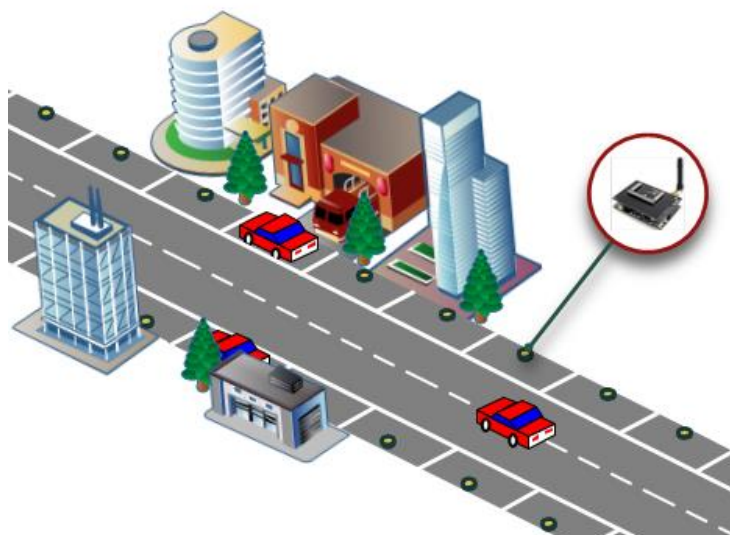


Figura 4.9: Ubicación de las motas en las plazas de parqueo

Existen 55 zonas de parqueo a lo largo de la avenida, de ésta manera se obtuvieron las coordenadas geográficas con la ayuda de la herramienta Google Earth, para la ubicación de un sensor por cada plaza. Es necesario considerar que el alcance de los sensores es limitado y que la interferencia del suelo ocasionará pérdidas de propagación evitando establecer un enlace, por tal motivo el uso de nodos repetidores es indispensable para el direccionamiento de la señal. Estos se ubicarán a una altura de 3.5m, tal como aparecen en la figura 4.10 de color amarillo y los nodos sensores de color morado.



Figura 4.10: Ubicación de nodos sensores y repetidores en la Av. 9 de Octubre

4.6 Resultados

En los 3 tipos de escenarios mencionados en la tabla 8 se analizaron 2 casos, el primer caso tomando en cuenta solo la interconexión de las motas instaladas en el suelo y el segundo en donde se agregan las repetidoras.

El enlace entre motas se realizó tomando en cuenta los datos de la tabla 9 donde cada SNR trabaja con su respectiva velocidad de trasmisión.

Rango de SNR [dB]	Velocidad de transmisión [kbits/seg]	Color
$3 \geq \text{SNR} < 6$	250	Fucsia
$6 \geq \text{SNR} < 9$	500	Verde
$9 \geq \text{SNR} < 12$	1000	Negro
$\text{SNR} \geq 12$	2000	Azul

Tabla 9: Parámetros de velocidad de transmisión con respecto al SNR [42].

- Caso 1:

Escenario 1

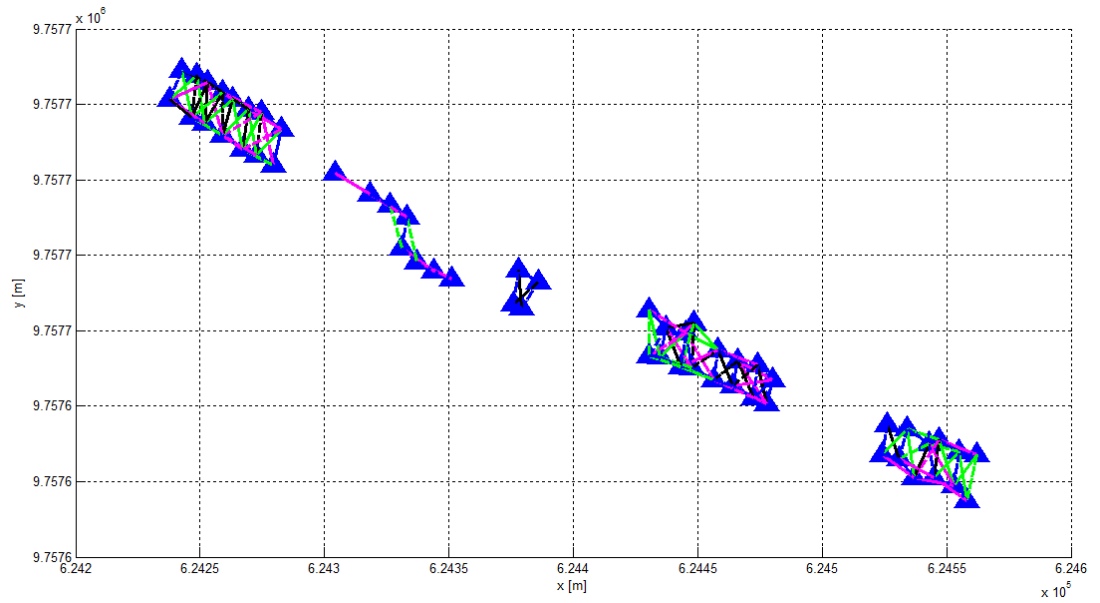


Figura 4.11: Conexiones de la moto, Pnoise = -76.05dBm

Escenario 2

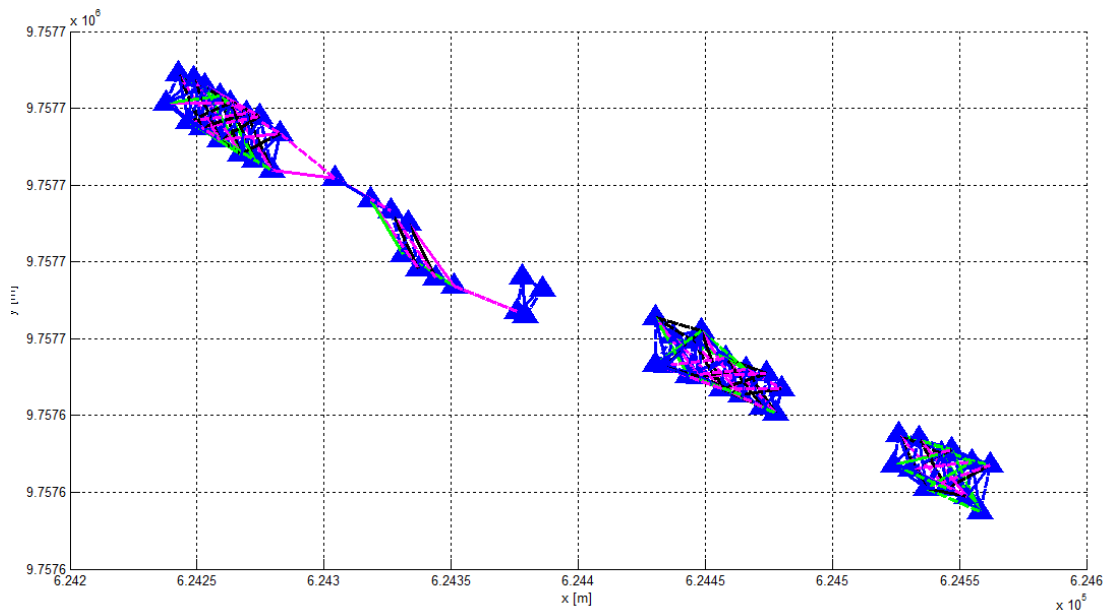


Figura 4.12: Conexiones de la moto, cuando existe un Pnoise = -84.4dBm

Escenario 3

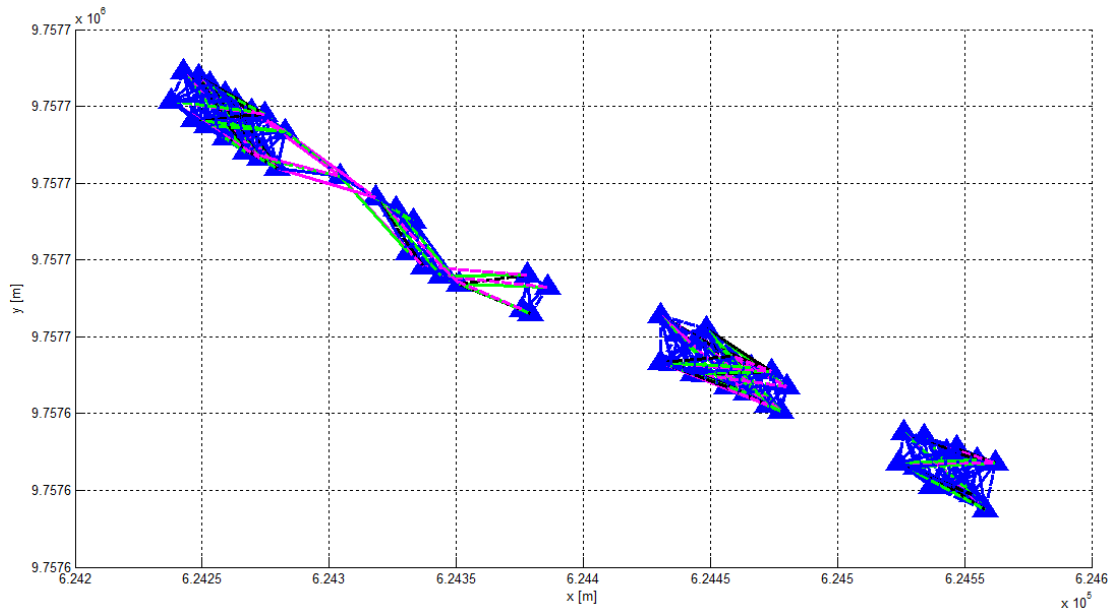


Figura 4.13: Conexiones de la mota, cuando existe un $P_{noise} = -92.53\text{dBm}$

Como se puede analizar en los 3 escenarios, existen 5 grupos de motas aisladas en el primer escenario; en el segundo y tercero sólo tienen 3, esto se debe a que el escenario 2 y 3 tiene un nivel de ruido intermedio y bajo, a pesar de que hay menos interferencia no se logra que todos los grupos estén enlazados. A medida que el ruido disminuye, aumenta la velocidad de transmisión de los datos y los enlaces entre los nodos en la cual se lo puede apreciar en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13, entendiendo lo que significa cada color de enlace entre las motas en la tabla 4.5.

- Caso 2:

Escenario 1

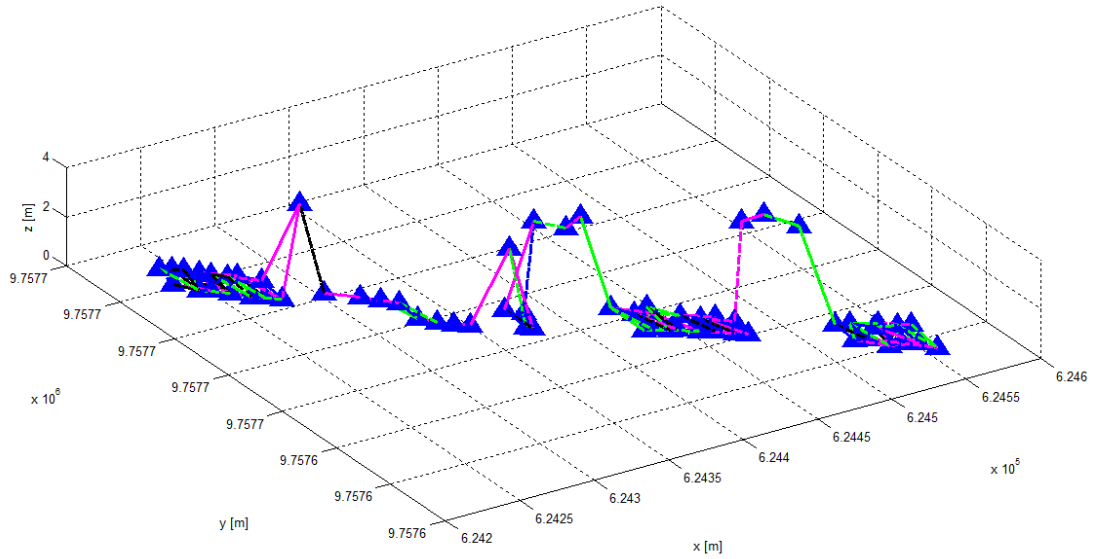


Figura 4.14: Escenario de las motas con las repetidoras a $P_{\text{noise}} = -76.05\text{dBm}$.

Escenario 2

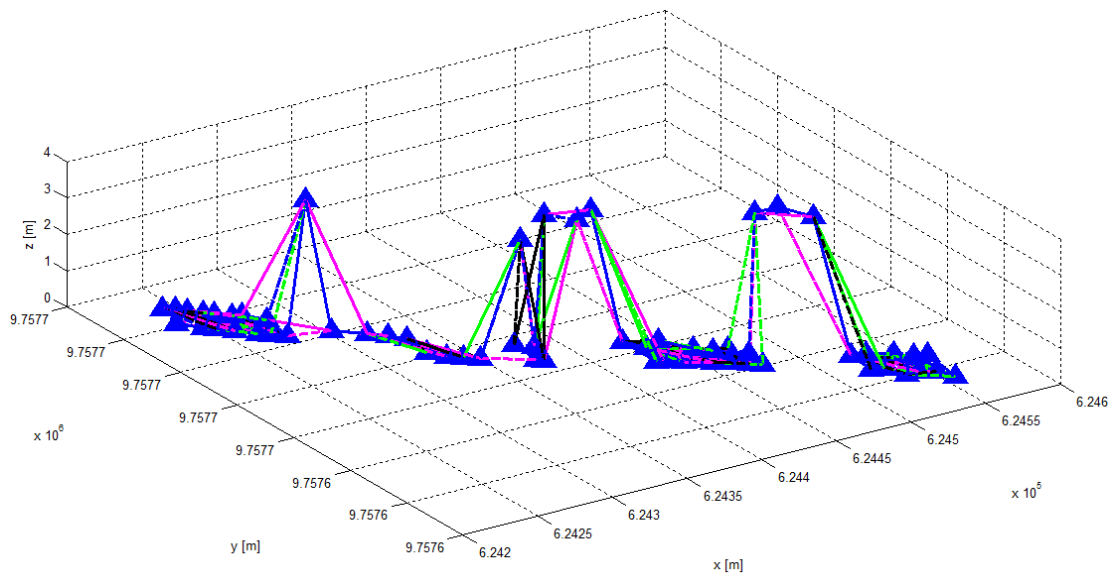


Figura 4.15: Escenario de las motas con las repetidoras a $P_{\text{noise}} = -84.4\text{dBm}$.

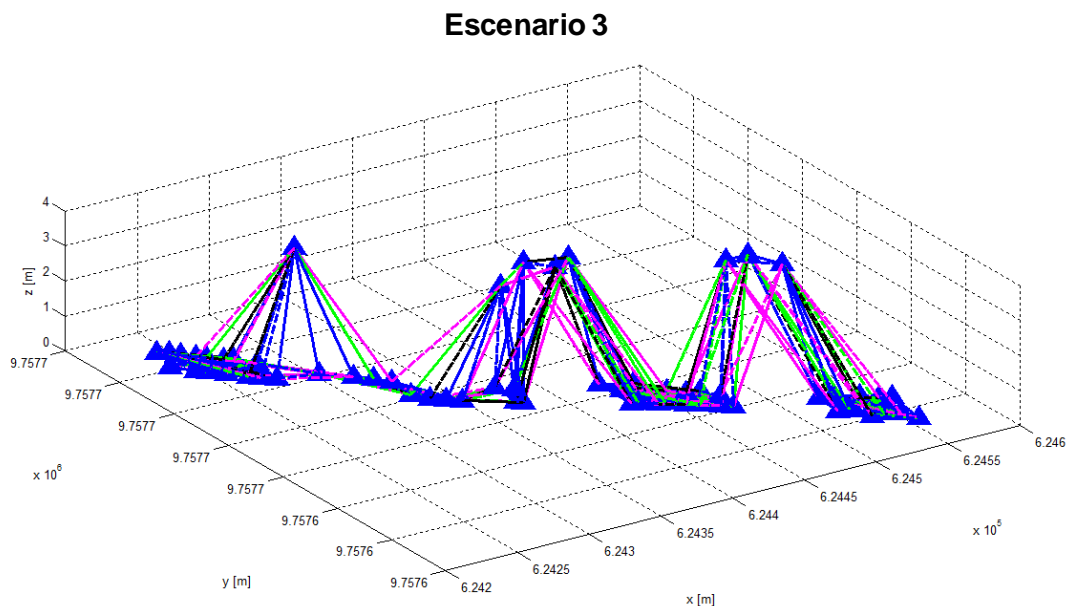


Figura 4.16: Escenario de las motas con las repetidoras a $P_{noise} = -92.53\text{dBm}$

Debido a que la señal se atenúa y se distorsiona a medida que la distancia entre las motas vaya aumentando se tuvo que agregar repetidoras para lograr que todos los grupos aislados queden conectados como se muestra en la figura 4.14, 4.15 y 4.16.

Análisis estocásticos de las motas:

Para el análisis de los resultados se generaron gráficas CDF empíricas que demuestran la calidad del enlace por medio de los siguientes parámetros: SNR, velocidad de transmisión y capacidad de canal, para los 3 escenarios mencionados anteriormente.

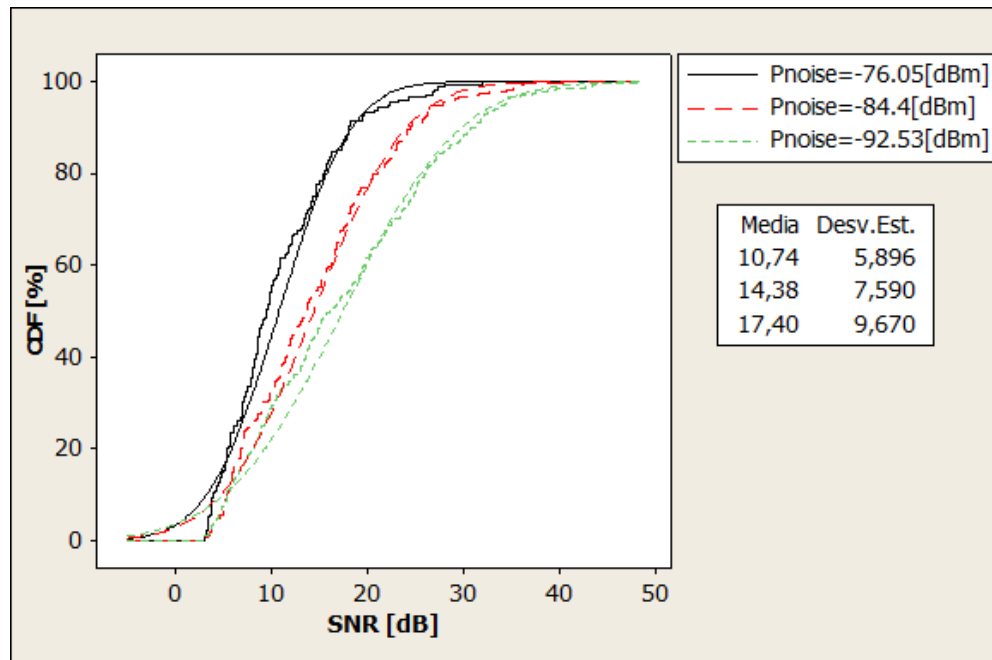


Figura 4.17: Relación entre la señal y el ruido (SNR)

Potencia del Ruido [dB]	Punto de referencia mínima SNR mín =3 [dB]
-76.05	9.71%
-84.4	6.64%
-92.53	6.63%

Tabla 10: Probabilidad de que exista una mota aislada según la figura 4.17.

El SNR mínimo establecido por el protocolo Zigbee es de 3 dBm, por lo tanto aquellos valores menores a este no permitirán la interconexión entre nodos, de esta manera en la tabla 10 se demostró que en todos los escenarios la probabilidad de que la señal sea afectada por el ruido es mínima como se observa en la figura 4.17.

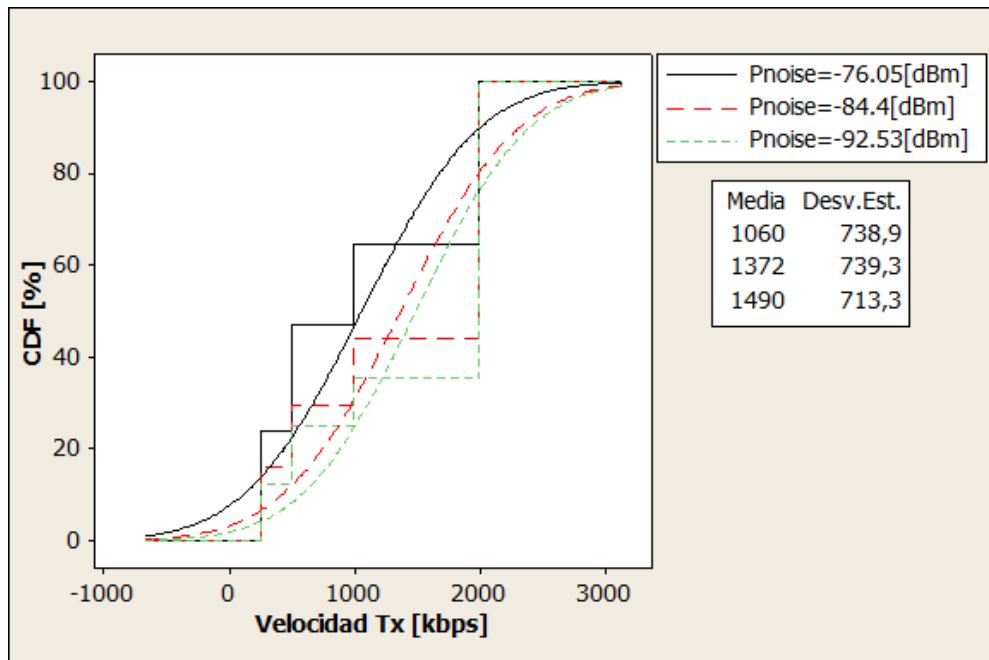


Figura 4.18: Velocidad de transmisión

Se observa en la figura 4.18 que en el escenario cuando la $P_{noise} = -76.05$ dB tiene la media más baja en comparación con los otros de 1060 [kbps] en el cual es una velocidad aceptable definida en la tabla 9, entonces en los 3 escenarios se concluye que la sincronización entre el emisor y el receptor va ser de manera muy rápida.

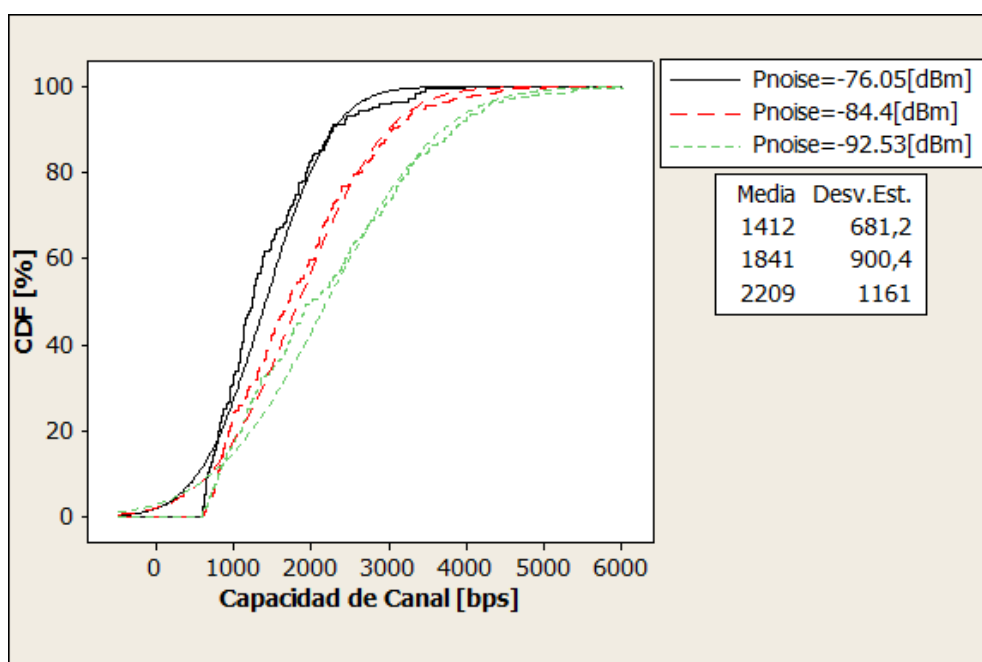


Figura 4.19: Capacidad máxima de canal

Potencia del Ruido [dB]	Capacidad del Canal=592.67[bps]
-76.05	9.98%
-84.4	8.81%
-92.53	8.80%

Tabla 11: Probabilidad de error en la cantidad de información que puede transportar el canal.

En la figura 4.19 nos dio a conocer la cantidad de información máxima fiable que puede ser transmitida sin error sobre dicho enlace en los diferentes escenarios, pero en toda comunicación siempre existe una pequeña probabilidad de error la cual fue analizada en la tabla 11. Se tomó como referencia la capacidad de canal de 592.67 bps que fue hallada con respecto a un SNR menor 3 dBm, por lo tanto, dado que la probabilidad de error es mínima, se aprovecha al máximo el ancho banda.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base al análisis obtenido de los resultados de la simulación, el proyecto resulta viable y con un futuro prometedor en el campo de Smart Mobility, habiéndose logrado crear un diseño de red de sensores inalámbricos en la avenida 9 de octubre, que podría reducir el tiempo de búsqueda de aparcamiento aliviando la congestión del tráfico.

Waspnote resultó ser la mejor solución para recolectar datos que se generan al monitorear plazas de estacionamientos, debido a su diseño que fue creado para aplicarse en redes de sensores inalámbricas con tasa de transmisión baja y suficiente para el tamaño que trabaja la trama, sin usar estándares con tecnología muy cara como wifi o bluetooth.

Gracias a la simulación en Matlab se pudo analizar el comportamiento de las motas de acuerdo al modelo de pérdida de propagación por la Recomendación UIT-R P.1411-6, que resultó ser el más ideal para un escenario en el exterior de corto alcance.

Las repetidoras fueron de vital importancia en el diseño de la red, para establecer enlace con los grupos de motas aislados que no lograban comunicarse por las diferentes interferencias que existen en el medio.

Se logró que todos los sensores trabajen con un SNR mayor al valor especificado por el protocolo Zigbee, incluso en un escenario que presenta alto nivel de ruido.

Para obtener un mejor desempeño del proyecto se recomienda usar la plataforma gratuita Google Earth para conocer de forma más precisa la ubicación de las plazas de parqueo o de algún lugar en particular.

Investigar el tema sobre las Smart City de una forma más amplia y analizar las aplicaciones que se han desarrollado en Europa para poder implementar en ciudades como Guayaquil.

Disponer de datos actualizados del sistema tales como número de parqueos y datos estadísticos, para poder efectuar estudios previos y tener un fácil acceso a esa información.

BIBLIOGRAFÍA

[1] ANE (2015, Septiembre 25). Ecuador: Parque Automotor supera los 2.2 Millones De Unidades [Online]. Disponible en:
<http://radioequinoccio.com/inicio/item/5809-ecuador-pqrque-automotor-supera-los-22-millones-de-unidades.html>.

[2] Market Watch Ecuador (2015), Parque automotor Ecuador 2014, [Online]. Disponible en: <http://marketwatch.com.ec/2015/06/cifras-parque-automotor-2014>.

[3] El Siglo (2015, Abril 27), Panamá, entre los países de América con más automóviles, [Online]. Disponible en:
<http://elsiglo.com/panama/panama-entre-paises-america-automoviles/23861378>.

[4] El Universo (2015, Agosto 27), Doble columna y uso de zonas prohibidas, problemas por resolver en Guayaquil, [Online]. Disponible en:
<http://www.eluniverso.com/noticias/2015/08/27/nota/5087570/doble-columna-uso-zonas-prohibidas-problemas-resolver>.

[5] C. Morales, (2013, Octubre 17), FLUIDEZ EN EL TRANSITO VIAL: UN COMPROMISO DE TODOS, [Online]. Disponible en:
<https://transvial.wordpress.com/2013/10/17/fluidez-en-el-transito-vehicular-un-compromiso-de-todos/>

[6] F. Staff (2016, Septiembre 4), Ciudad de México, la urbe con más tráfico vehicular en el mundo, [Online]. Disponible en: <http://www.forbes.com.mx/ciudad-mexico-la-mayor-traffic-vehicular-mundo-tomtom/>.

[7] Comunidad Vial MX (2015, Junio 8), "Problema de estacionamiento en la ciudad", [Online]. Disponible en:
<http://www.comunidadvialmx.org/articulos/2015-06-08-problema-de-estacionamiento-en-la-ciudad>.

[8] ViveUSA (2014, Febrero 17), "El precio de estacionarse en Estados Unidos", [Online]. Disponible en:
<http://www.viveusa.mx/articulo/2014/02/17/tu-primera-vez/el-precio-de-estacionarse-en-estados-unidos>.

[9] A. Alejandro Patricio, "Aplicación de asistencia a usuarios del transporte público a través de una aplicación Web", Titulación de Ingeniero Informático, Universidad Técnica Particular De Loja, 2012. Disponible en:

<http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/3779/1/Andrade%20Hurtado%20Alejandro%20Patricio.pdf>

[10] D. Bravo y P. Terán (2015, Abril 6), En Quito se sanciona a 150 personas cada día por mal estacionar sus vehículos, [EL COMERCIO], Disponible en:

<http://www.elcomercio.com/actualidad/quito-sanciona-mal-estacionados-amt.html>

[11] El Telégrafo (2015, Agosto 3), La congestión vehicular, un problema sin resolver en Guayaquil, [Online]. Disponible en:

<http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/guayaquil/10/la-congestion-vehicular-un-problema-sin-resolver-en-guayaquil>

[12] Y. Silva Rodríguez (2012, Junio) Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica, Universitat Rovira I Virgili, España. Disponible en:

<http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1934pub.pdf>

[13] Tecnología - Vanguardia.com (2016, Abril 13), Santander, España, una ciudad muy inteligente, [Online]. Disponible en:

<http://www.vanguardia.com/mundo/tecnologia/354421-santander-espana-una-ciudad-muy-inteligente>.

[14] ParcUPC (2013, Abril 30), Urbíotica inaugura el proyecto de aparcamiento inteligente en la ciudad de Niza, [Online]. Disponible en:

<http://www.upc.edu/parcupc/noticies/urbiotica-inaugura-el-proyecto-de-aparcamiento-inteligente-en-la-ciudad-de-niza/>.

[15] I. P. Sánchez, C. F. Shicay, Diseño De Infraestructura De Red Para Gestión De Parqueo En El Casco Urbano De La Ciudad De Cuenca, Tesis de Obtención de Título, Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, 2015. Disponible en:

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8049/1/UPS-CT004891.pdf>

[16] Endesa Educa (2014), Las tecnologías TIC en la Smart City, [Online].

Disponible en:

http://www.endesaeduca.com/Endesa_educarecursos-interactivos/smart-city/TIC.

- [17] Dreamstime.com (2016), Smart city concept and internet of things, [Online]. Disponible en: <https://www.dreamstime.com/stock-illustration-smart-city-concept-internet-things-different-icon-elements-modern-design-future-technology-living-image66876194>.
- [18] TU WIEN (2015), The smart city model, [Online]. Disponible en: <http://www.smart-cities.eu/?cid=2&ver=4>.
- [19] Smart City Expo World Congress (2015), Copenhagen Smart City, [Online]. Disponible en: <http://www.smartcityexpo.com/copenhagen-smart-city>.
- [20] WIEN (2016), Viena, Ciudad Inteligente, [Online]. Disponible en: <https://www.wien.info/es/vienna-for/smart-city-vienna>
- [21] WIEN (2015), Viena, Tecnología Inteligente, [Online]. Disponible en: <https://www.wien.info/es/vienna-for/smart-city-vienna/smart-technology>
- [22] Innovacion.cl (2014, Enero 14), Descubra las 10 ciudades más inteligentes de Europa, [Online]. Disponible en: <http://www.innovacion.cl/2014/01/descubra-las-10-ciudades-mas-inteligentes-de-europa/>
- [23] Conciencia Sustentable Abililia (2016, Abril 17), París aprueba proyecto futurista de renovación total para 2050, [Online]. Disponible en: <http://conciencia-sustentable.abililia.mx/paris-proyecto-futurista-renovacion-total-2050/>
- [24] Smart City Santiago (2015), [Online]. Disponible en: <http://www.smartcitysantiago.cl/#!/block-2>.
- [25] Endesa Educa (2014), Smart Cities, [Online]. Disponible en: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/.
- [26] H. Morillo, F. Pérez y D. Jorquera, Redes Inalámbricas de Sensores Inteligentes. Aplicación a la Monitorización de Variables Fisiológicas, Departamento de Tecnología Informática y Computación, Universidad de Alicante, España. Disponible en: <https://www.dtic.ua.es/grupoM/recursos/articulos/JDARE-06-H.pdf>
- [27] M. Gutiérrez (2015, Agosto 10), ZigBee, la tecnología barata para comunicación inalámbrica, [Online]. Disponible en: <http://www.elandroidelibre.com/2015/08/todo-sobre-zigbee-la-tecnologia-ultrabarata-para-comunicacion-inalambrica.html#>.

- [28] E. Rico (2016), Qué es el estándar 802.15.4 para comunicaciones inalámbricas de Internet de las Cosas, [Online]. Disponible en: <http://www.ermesh.com/802-15-4-internet-de-las-cosas/>
- [29] M. Glen M. and J. Moreno (2012, Mayo 23), Sistemas de Transmisión - ZIGBEE, [Online]. Disponible en: <https://sx-de-tx.wikispaces.com/ZIGBEE>.
- [30] J. Longares (2013, Abril 7), Introducción a Zigbee y las redes de sensores inalámbricas, [Online]. Disponible en: <http://www.javierlongares.com/arte-en-8-bits/introduccion-a-zigbee-y-las-redes-de-sensores-inalambricas/>
- [31] I. Barneda, ZIGBEE APLICADO A LA TRANSMISIÓN DE DATOS DE SENSORES BIOMÉDICOS, Tesis de Grado, Departamento de Sistema Electrónicos, Universitat Autònoma de Barcelona, 2008. Disponible en: <http://www.recercat.cat/bitstream/handle/2072/13081/PFC%20Ivan%20Barneda.pdf?sequence=1>
- [32] C. Moreno Pallo, CONSTRUCCIÓN DE UNA RED ZIGBEE PROTOTIPO PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS DESDE TRANSMISORES DE CORRIENTE DE DOS HILOS, Tesis de Grado, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, 2009. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/45699333_Construccion_de_una_red_ZigBee_prototipo_para_la_adquisicion_de_datos_desde_transmisores_de_corriente_de_dos_hilos
- [33] Esmartcity (2014, Enero 30), Amsterdam Smart City, por la sostenibilidad y un mayor nivel de vida - SMARTCITY, [Online]. Disponible en: <https://www.esmartcity.es/articulos/amsterdam-smart-city-por-la-sostenibilidad-y-un-mayor-nivel-de-vida>.
- [34] BCN Smart City (2015), Barcelona Smart City, [Online]. Disponible en: <http://smartcity.bcn.cat/es/>.
- [35] Seoul (2014), Transporte, [Online]. Disponible en: <http://spanish.seoul.go.kr/informacion-sobre-politicas/transporte/>.

[36]C. Hermida and C. Hermida (2015, Septiembre 1), 8 lecciones de movilidad para las ciudades del futuro, Young Marketing, [Online]. Disponible en:

<http://www.youngmarketing.co/8-lecciones-de-movilidad-para-las-ciudades-del-futuro/#ixzz4Cq7KksqF>.

[37] ITU (2015), Recomendación ITU-R P.1411-8. Disponible en:

https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-8-201507-!!!PDF-E.pdf

[38] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L (2016), WaspoteTechnical Guide, v6.3, Disponible en:

<http://www.libelium.com/development/waspote/documentation/waspote-technical-guide/>

[39] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L (2016), Smart Parking Technical Guide, v5.1, Disponible en:

<http://www.libelium.com/development/waspote/documentation/smart-parking-board-technical-guide/>

[40] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. (2014), Meshlium Xtreme Datasheet, v4.4, Disponible en:

<http://www.libelium.com/development/meshlium/documentation/meshlium-technical-guide/>

[41] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. (2016), Waspote Plug & Sense! Technical Guide, v6.1, Disponible en:

<http://www.libelium.com/development/plug-sense/documentation/waspote-plug-sense-technical-guide/>

[42] Skyworks Solutions, Inc. (2011, Abril 8), Extending 2.4 GHz ZigBee® Short-Range Radio Performance with Skyworks SKY65344/SKY65343 Front-End Modules, Disponible en: <http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/201527A.pdf>

ANEXOS

ANEXO A

ABREVIATURAS

ALDF	Asamblea Legislativa del Distrito Federal
ANE	Agencia de Noticias de Ecuador
BPSK	Modulación por Desplazamiento de Bifásico
CCI	Centro Comercial Ñaquito
CDF	Función de Distribución Acumulativa Empírica
dBi	Decibelio-antena isotrópica
dBm	Decibelio-Mili vatio
EEPROM	ROM programable y borrable eléctricamente (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
FFD	Full Function Devices
GPRS	Servicio general de paquetes vía radio (General Packet Radio Service)
GPS	sistema de Posicionamiento Global
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
I2C	Circuito Interintegrado (Inter-Integrated Circuit)
O-QPSK	Modulación por Cambio de Fase en Cuadratura con Offset
RFD	Reduced Function Devices
RTC	Reloj en tiempo real (Real-Time Clock)
SNR	Relación Señal/Ruido
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Memoria estática de acceso aleatorio (Static Random Access Memory)
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UIT-R	Sector de Radiocomunicaciones de la UIT
USB	Universal Serial Bus
WPAN	Red Inalámbrica de Área Personal
WSN	Redes de Sensores Inalámbricas
ZB	Zigbee

ANEXO B

CÓDIGO DE SIMULACIÓN EN MATLAB

Ubicación de las motas:

```
clear all,close all,clc
num_ap=63;
P=[624562.00 9757627.00 0; 624555.00 9757628.00 0; 624547.00 9757631.00 0; % 1 2 3
 624543.00 9757630.00 0; 624534.00 9757634.00 0; 624526.00 9757635.00 0; % 4 5 6
 624558.00 9757615.00 0; 624553.00 9757619.00 0; 624545.00 9757621.00 0; % 7 8 9
 624537.00 9757621.00 0; 624531.00 9757626.00 0; 624524.00 9757627.00 0; %10 11 12
 624480.00 9757647.00 0; 624474.00 9757651.00 0; 624466.00 9757652.00 0; %13 14 15
 624458.00 9757655.00 0; 624448.34 9757661.96 0; 624445.33 9757659.35 0; %16 17 18
 624437.29 9757660.63 0; 624430.40 9757665.49 0; 624477.49 9757640.50 0; %19 20 21
 624472.30 9757642.31 0; 624463.92 9757645.35 0; 624456.55 9757647.04 0; %22 23 24
 624447.49 9757650.18 0; 624443.24 9757650.46 0; 624434.81 9757653.14 0; %25 26 27
 624430.58 9757653.31 0; 624386.00 9757673.00 0; 624378.00 9757676.00 0; %28 29 30
 624379.00 9757666.00 0; 624376.00 9757667.00 0; 624350.98 9757673.75 0; %31 32 33
 624344.02 9757675.82 0; 624337.11 9757678.33 0; 624331.00 9757682.00 0; %34 35 36
 624333.00 9757690.00 0; 624326.38 9757693.21 0; 624318.21 9757696.30 0; %37 38 39
 624304.14 9757701.80 0; 624282.80 9757713.32 0; 624274.70 9757717.90 0; %40 41 42
 624269.52 9757718.69 0; 624262.98 9757721.28 0; 624258.97 9757723.14 0; %43 44 45
 624253.04 9757725.75 0; 624248.49 9757727.59 0; 624242.74 9757729.04 0; %46 47 48
 624279.45 9757703.97 0; 624272.80 9757706.63 0; 624266.92 9757708.07 0; %49 50 51
 624259.21 9757711.88 0; 624252.00 9757715.01 0; 624246.60 9757716.45 0 %52 53 54
 624237.74 9757721.37 0; 624518.00 9757644.00 3.5; 624509.00 9757652.00 3.5; %55
 624494.00 9757652.00 3.5; 624420.00 9757671.00 3.5; 624405.00 9757668.00 3.5;
 624394.00 9757674.00 3.5; 624363.00 9757666.00 3.5; 624295.00 9757706.00 3.5];
P=P';
```

Matriz de posiciones:

```
Pt=17; %[dBm]
Gt=5;
Gr=5;
f=2450e6; %[Hz]
Pnoise=-92.53; %[dBm]
plot3(P(1,:),P(2,:),P(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 entre las motas:

```
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:

```

freq= 2450; %[MHz]
hm= 0.15;
hb= 0.15;

L_absorption=10; %[dB]

%Modelo de Propagacion Recomendac?on UIT-R P.1411-6
Lambda= 0.122449;
Rbp= abs((4*(hb)*(hm))/Lambda);
Lbp= abs(10*log10((Lambda)^2/(8*pi*(hb)*(hm))));

if(d<=Rbp)
    L1= 25*log10(d/Rbp);
else
    L1= 40*log10(d/Rbp);
end
L= -(Lbp +20+ L1 + L_absorption);

```

Determinar Capacidad de Canal máxima:

```

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;
        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;
        end
    end
end
CC_2=(B/sp_f)*log2(1+10.^(S_N/10))/1e3;

```

ANEXO C

VALIDACIÓN DEL CÓDIGO DE MATLAB

Coordenadas de las motas:

Primera mota: (624562.00, 9757627.00, 0)

Segunda mota: (624555.00, 9757628.00, 0)

Tercera mota: (624553.00, 9757619.00, 0)

Hallar las distancias entre las motas:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Distancia entre la primera y segunda mota:

$$d = \sqrt{(624562.00 - 624555.00)^2 + (9757627.00 - 9757619.00)^2}$$
$$d = \sqrt{7^2 + 8^2}$$
$$d = 10.63$$

En Matlab:

$$d = 7.07$$

Distancia entre la segunda y tercera mota:

$$d = \sqrt{(624555.00 - 624553.00)^2 + (9757628.00 - 9757619.00)^2}$$
$$d = \sqrt{2^2 + 9^2}$$
$$d = 9.23$$

En Matlab:

$$d = 9.22$$

Distancia entre la tercera y primera mota:

$$d = \sqrt{(624553.00 - 624562.00)^2 + (9757619.00 - 9757627.00)^2}$$
$$d = \sqrt{(-9)^2 + (-8)^2}$$
$$d = 12.04$$

En Matlab:

$$d = 12.04$$

Pérdida de Propagación:

$$L_{LoS} = L_{bp} + 20 + L_{absorption} + \begin{cases} 25 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d \leq R_{bp} \\ 40 \log_{10} \left(\frac{d}{R_{bp}} \right) & \text{para } d > R_{bp} \end{cases} \quad [dB]$$

Longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300000000}{2.45 \times 10^9} = 0.122 \text{ [m]}$$

Distancia al punto de inflexión:

$$R_{bp} \approx \frac{4h_b h_m}{\lambda} \text{ [m]}$$

$$R_{bp} = \frac{4(0.15)(0.15)}{0.122} = 0.738 \text{ [m]}$$

Pérdidas básicas de transmisión en el punto de inflexión:

$$L_{bp} = \left| 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{8\pi h_b h_m} \right) \right|$$

$$L_{bp} = \left| 10 \log_{10} \left(\frac{0.122^2}{8\pi (0.15)(0.15)} \right) \right| = 15.80 \text{ [dB]}$$

Pérdida de Propagación entre la primera y segunda mota

$$L_{LoS} = 15.80 + 20 + 10 + 40 \log_{10} \left(\frac{10.63}{0.738} \right) \text{ [dB]}$$

$$L_{LoS} = 92.14 \text{ [dB]}$$

En Matlab:

$$L_{LoS} = 85.09 \text{ [dB]}$$

Pérdida de Propagación entre la segunda y tercera mota

$$L_{LoS} = 15.80 + 20 + 10 + 40 \log_{10} \left(\frac{9.23}{0.738} \right) \text{ [dB]}$$

$$L_{LoS} = 89.69 \quad [dB]$$

En Matlab:

$$L_{LoS} = 89.70 \quad [dB]$$

Pérdida de Propagación entre la tercera y primera mota

$$L_{LoS} = 15.80 + 20 + 10 + 40 \log_{10} \left(\frac{12.04}{0.738} \right) \quad [dB]$$

$$L_{LoS} = 94.30 \quad [dB]$$

En Matlab:

$$L_{LoS} = 94.34 \quad [dB]$$

Potencia del receptor:

$$P_r = G_b + G_m + P_t - L \quad [dB]$$

Potencia del receptor de la primera y segunda mota:

$$P_r = 5 + 5 + 17 - 92.14 = -65.14 \quad [dB]$$

En Matlab:

$$P_r = -58.09 \quad [dB]$$

Potencia del receptor de la segunda y tercera mota:

$$P_r = 5 + 5 + 17 - 89.69 = -62.68 \quad [dB]$$

En Matlab:

$$P_r = -62.70 \quad [dB]$$

Potencia del receptor de la tercera y primera mota:

$$P_r = 5 + 5 + 17 - 94.30 = -67.3 \quad [dB]$$

En Matlab:

$$P_r = -67.34 \quad [dB]$$

Relación Señal y Ruido:

$$S / N_{dB} = P_r - P_{noise} \quad [dB]$$

Relación Señal y Ruido de la primera y segunda mota:

$$S / N_{dB} = -65.14 - (-76.05) = 10.91 \quad [dB]$$

En Matlab:

$$S / N_{dB} = 17.96 \quad [dB]$$

Relación Señal y Ruido de la segunda y tercera mota:

$$S / N_{dB} = -62.68 - (-76.05) = 13.37 \quad [dB]$$

En Matlab:

$$S / N_{dB} = 13.35 \quad [dB]$$

Relación Señal y Ruido de la tercera y primera mota:

$$S / N_{dB} = -67.3 - (-76.05) = 8.75 \quad [dB]$$

En Matlab:

$$S / N_{dB} = 8.71 \quad [dB]$$

Capacidad máxima del canal:

$$C = \frac{B}{8} * \frac{\log_2(1 + 10^{\frac{SNR}{10}})}{1 \times 10^3} \quad [bps]$$

Capacidad máxima del canal de la primera y segunda mota:

$$C = \frac{3 \times 10^6}{8} * \frac{\log_2(1 + 10^{\frac{10.91}{10}})}{1 \times 10^3} = 1401.27 \quad [bps]$$

En Matlab:

$$C = 2245.5 \quad [bps]$$

Capacidad máxima del canal de la segunda y la tercera mota:

$$C = \frac{3 \times 10^6}{8} * \frac{\log_2(1 + 10^{\frac{13.37}{10}})}{1 \times 10^3} = 1689.87 \quad [bps]$$

En Matlab:

$$C = 1687.3 \quad [bps]$$

Capacidad máxima del canal de la tercera y la primera mota:

$$C = \frac{3 \times 10^6}{8} * \frac{\log_2(1 + 10^{\frac{8.75}{10}})}{1 \times 10^3} = 1157.73 \text{ [bps]}$$

En Matlab:

$$C = 1153.2 \text{ [bps]}$$

Se concluye que el margen de error es mínimo con respecto a los resultados adquiridos en Matlab.