



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

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

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO/A EN ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES**

ZAIDA KATHERINE PERALTA GAMBOA

RICHARD ANDRES BRAVO ASANZA

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Dios porque Él es el motor de mi vida, a mi papá por estar siempre conmigo y por formarme para que siempre consiga mis metas, a mi mamá por dármele todo por ser mi fuerza y ayuda siempre que lo necesité sin ella no sería nada, a mi familia por ver siempre en mí a una mujer de bien, a mis hermanos, gracias porque todos han sido un factor importante para que hoy pueda decir ¡Lo logré!... La gloria es de Dios.

Zaida Katherine Peralta Gamboa

Agradezco primeramente a Dios por haberme dado toda la fortaleza para superar cada obstáculo de mi vida, a mis padres y a mi hermano por ser quienes en el día a día me brindaron todo su apoyo y motivación para seguir adelante. A mis familiares por darme todo su apoyo incondicional. A todos los profesores y amigos que nos han ayudado a lo largo de la vida universitaria

Richard Andres Bravo Asanza

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a la mujer más importante de mi vida que aunque hoy no esté aquí ella siempre soñó con este día, y estaría muy orgullosa, para mi Mami Jovita, gracias... Gracias por cuidarme y haberme dado alegría, gracias porque me enseñaste lo que significa amar a la familia, gracias por ayudarme a salir adelante, por sembrar en mi lo que hoy estoy cosechando y gracias por haber hecho que nunca me falte amor cuando más lo necesité...

Zaida Katherine Peralta Gamboa

El presente proyecto lo dedico a mi padre Wilson y a mi madre Gloria que supieron darme la motivación, confianza y apoyo para superar cada obstáculo que se presentaron durante cada fase de mi vida. A mi tía Elsy, y toda mi familia por mostrarme siempre un apoyo incondicional, y a mis amigos que estuvieron durante el transcurso de mi vida universitaria.

Richard Andrés Bravo Asanza

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Carlos Valdivieso A. MSc.

PROFESOR EVALUADOR

.....
Miguel Molina V. 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"

Zaida Peralta Gamboa

Richard Bravo Asanza

RESUMEN

Con el paso del tiempo los avances en las telecomunicaciones nos brindan diversas soluciones para prever problemas a futuros en diferentes áreas tales como: la agricultura, la contaminación en las ciudades, las infraestructuras, etc., todo esto debido y gracias a las Redes de Sensores Inalámbricos o WSN por sus siglas en inglés (Wireless Sensor Networks), las mismas que nos permiten por medio de sensores inteligentes monitorear actividades en el escenario que deseemos estudiar, las ciudades de países desarrollados han establecido proyectos a gran escala para el monitoreo de varios factores las mismas que están catalogadas como Smart Cities, las cuales por medio de las tecnologías de la información (TIC) y el uso de componentes electrónicos o sensores inteligentes le han permitido a los ciudadanos llevar una vida en condiciones más óptimas.

Nuestro proyecto se basa en el monitoreo de las vibraciones de un puente o la salud estructural del mismo, el Ecuador por encontrarse en el cinturón de fuego del Pacífico es un país activo en cuanto a actividades sísmicas, nuestro proyecto pretende diseñar una red de sensores para el monitoreo de puentes el mismo que permitirá llevar un control de actividades anormales que puedan afectar a su estructura y así evitar colapsos del mismo que puedan ocasionar graves consecuencias como la caída del mismo o pérdida de vidas humanas.

Para lograr nuestro objetivo se realizó el despliegue de una red de sensores para el monitoreo de la estructura de un puente diseñando cada nodo sensor o mota tomando en cuenta los factores que podrían afectar al escenario a monitorear y resaltando que trabajaremos en la banda de 2.4Ghz, se estableció un modelo de propagación adecuado y se realizó la simulación de la conectividad de los nodos sensores en la plataforma de Matlab.

En este trabajo, en el Capítulo 1 se presenta la descripción del problema, en el Capítulo 2 el estado del arte de WSNs y Smart Cities, en el Capítulo 3 la metodología del proyecto, en el Capítulo 4 los análisis de resultados, en el Anexo 1 el diseño esquemático de la mota, en el Anexo 2 el diseño PCB de la mota, en el Anexo 3 el código de la simulación y en el Anexo 4 la validación del código.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN.....	vi
CAPÍTULO 1.....	9
1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA.....	9
1.1 Antecedentes.....	9
1.2 Problemática.....	11
1.3 Justificación	13
1.4 Objetivos.....	14
1.4.1 Objetivo General.....	14
1.4.2 Objetivos Específicos	14
1.5 Metodología.....	15
1.6 Alcance.....	16
CAPÍTULO 2.....	18
2. ESTADO DEL ARTE.	18
2.1 Smart Cities	18
2.2 Smart Cities en el mundo	20
2.3 Redes WSN.....	23
2.3.1 Componentes	23
2.3.2 Topología de Red	25
2.4 Tecnología Zigbee.....	27

2.4.1 Regulación	29
2.4.2 Características Técnicas	30
2.5 Proyectos hechos con WSN.....	30
CAPÍTULO 3.....	33
3. METODOLOGÍA.....	33
3.1 Descripción del Escenario	33
3.2 Metodología.....	34
3.3 Formulación Matemática	36
3.1 Algoritmo	39
CAPÍTULO 4.....	39
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
4.1 Localización Exacta del Escenario	40
4.2 Diseño de la Mota.....	41
4.3 Gateway	44
4.4 Parámetros de configuración.....	46
4.5 Posiciones de los sensores	46
4.6 Resultados.....	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS.....	60

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

En los últimos años ha existido un crecimiento en lo que respecta a las tecnologías de redes inalámbricas, la idea de ciudades inteligentes ya no es una imaginación sino una realidad que se ha llevado a cabo en varias ciudades del mundo, las “Smart Cities” son un nuevo prototipo de ciudad que trabaja para mejorar la calidad de vida de sus ciudadanos promoviendo un desarrollo tecnológico, económico y social [1].

Una “Smart City” usa las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), lo que da como resultado una gestión más eficiente de los servicios y recursos de la ciudad, tales como la energía, el agua, la gestión de residuos, el monitoreo de infraestructuras, el manejo y control agrícola, el turismo y un sin número de factores que pueden ser tratados [1], las "Smart Cities" pueden usar redes de sensores inalámbricos que permiten monitorear, controlar y gestionar servicios de manera remota, en condiciones óptimas y entregando resultados eficientes.

Las aplicaciones que utilizan redes de sensores en la actualidad se encuentran en: el monitoreo de infraestructuras hechas por el ser humano, donde se analizan factores que pongan en riesgo el escenario evaluado para identificar posibles amenazas; en el monitoreo del medio ambiente, analizando los efectos climáticos y las enfermedades en la vegetación; en aplicaciones industriales, para mejorar el desempeño de las máquinas, en el control de tráfico, etc., donde los sensores ayudan a vigilar el flujo de vehículos en las vías [2].

A través de los años hasta la actualidad en Guayaquil no ha habido un estudio adecuado del estado de las infraestructuras específicamente de los puentes, siendo este un tema de vital importancia en todo el mundo, ya que hoy en día el estado estructural de una gran cantidad de puentes no es la más óptima. Un plan llamado “Radius” que se llevó a cabo en la ciudad de Guayaquil en la administración de León Febres Cordero hizo referencia a las fallas de varios

puentes de la ciudad siendo uno de ellos el puente de la Av. De las Américas frente al cuartel modelo diciendo: “Las trabas son elementos estructurales cuya función es evitar que las vigas simplemente apoyadas sobre las pilas de la estructura sufran un corrimiento lateral producto de la acción de un sismo. Por un mal diseño de las trabas, las vigas pueden caer a la calzada durante un sismo. Éste es el caso del puente que está en la Av. de las Américas frente a la Policía y la Universidad Laica” [3], no solamente este puente se vió afectado sino también el puente de la perimetral que aunque no tuvo daños significativos presentó fallas que en un futuro podrían traer consecuencias.

La mayoría de métodos de monitoreo de la estructura de puentes son basadas en inspección visual y dependen del punto de vista ingenieril del evaluador, habiendo opiniones acerca de la condición de los puentes muchas veces alejadas de la situación real de la estructura, debido a esto se necesitan tecnologías que nos brinden más precisión en los datos a analizar.

Debido a esto nuestro proyecto se ve orientado al diseño de una red de sensores para el monitoreo de puentes, el mismo que pretende también impulsar la idea de Guayaquil en convertirse en “Smart City”.

En la práctica, una Smart City es la que tiene la capacidad de dar respuesta a las necesidades de sus ciudadanos (medio ambiente, movilidad, negocios, comunicaciones, energía y vivienda, entre otras) mejorando su día a día [1], según este concepto podemos decir que la ciudad de Guayaquil tiene potencial para convertirse en una ciudad inteligente en el futuro.

Como dijimos anteriormente las “Smart Cities” utilizan redes de sensores inalámbricos los cuales nos brindan un diverso marco de oportunidades para diseñar, crear aplicaciones y sistemas capaces de facilitar el trabajo a las personas y reducir costos a futuro de los proyectos a monitorear.

En nuestro proyecto detallaremos el diseño y simulación de una red de sensores inalámbricos para monitorear la estructura del puente 5 de Junio ubicado en la ciudad de Guayaquil.

1.2 Problemática

El Ecuador se encuentra ubicado en el llamado "Cinturón de Fuego del Pacífico"; una de las zonas que tiene gran actividad sísmica en la Tierra por encontrarse frente al Océano Pacífico donde se lleva el proceso de subducción [4].

En el Ecuador no ha existido una metodología para el monitoreo o análisis adecuado de las estructuras sean estos edificios, túneles, puentes, etc., las caídas o daños en especial de los puentes puede acarrear problemas posteriores y estas se han producido a nivel mundial teniendo a continuación algunos ejemplos:

El puente Tacoma-Narrows ubicado en Tacoma (Washington, Estados Unidos) se construyó el 1 de julio de 1940. El 7 de noviembre de 1940, luego de tener apenas 4 meses de inauguración, el puente tuvo fallas en su estructura. El motivo de su caída se atribuyó al fuerte viento que soplaba contra el puente teniendo éste una velocidad de 60 kilómetros/hora en el momento de su caída, provocando que el puente oscilara con ondas de 1,5 y 8,5 metros, ocasionando que éste colapsara [5] como se observa en la Figura 1.1.

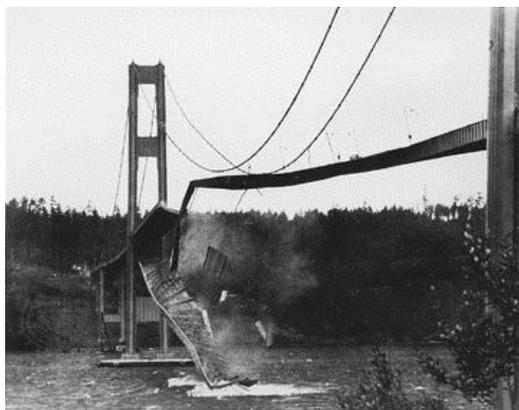


Figura 1.1: Colapso del Puente Tacoma Narrows

Otro ejemplo es el Puente Point Pleasant, se construyó 1928 sobre el río Ohio, este puente colgante unía Virginia Occidental con Kanagua-Ohio. El 15 de diciembre de 1967, el también llamado Silver Bridge se derrumbó como se

observa en la Figura 1.2 provocando la muerte de 46 personas y 9 heridos. La causa de su caída se debió al intenso tráfico, lo que provocó un peso superior al que podía soportar la estructura. Otra causa fue una falla en los soportes del puente, lo que provocó que el puente colapse en menos de un minuto. Tras el desastre ocurrido se revisaron los estándares del estado de estructuras en Estados Unidos, exigiendo una revisión periódica de las mismas con el propósito de evitar catástrofes como la ocurrida [5].



Figura 1.2: Caída del Puente Silver Bridge

Y un último ejemplo en el Ecuador en la ciudad de Guayaquil el puente ubicado en la Av. De las Américas frente al cuartel modelo colapsó el 16 de abril del 2016 luego del terremoto de 7.8 en la escala de Richter que afectó al país, como se muestra en la Figura 1.3.



Figura 1.3: Caída del paso a desnivel Av. De las Américas

Por los motivos antes expuestos, el contar con un monitoreo estructural de los puentes permitiría tomar acciones preventivas en tiempos adecuados, lo cual ayudaría a evitar congestionamiento vehicular, la inversión de grandes sumas de dinero por la reconstrucción de estas estructuras y una de las razones más importantes evitar pérdidas de vidas humanas.

1.3 Justificación

Dados los problemas mencionados en el inciso anterior, como son la falta de monitoreo y control de las estructuras de puentes se pueden implementar soluciones para evitar así consecuencias mayores a futuro.

Existen varias formas de solucionar estos problemas; de las cuales mencionaremos dos: el monitoreo de las estructuras de los puentes mediante fibra óptica o *BOTDR* (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry), y por medio de redes de sensores inalámbricos.

El monitoreo por medio de redes de sensores inalámbricos es la opción más conveniente escogida en nuestro caso ya que nos brinda muchas ventajas, tales como: un bajo costo económico, facilidad de instalación, excelente cobertura, precisión y frecuencia en las mediciones, bajo consumo de potencia, tiempo de respuesta adecuado, entre otras.

Éste tipo de soluciones ya han sido implementados en varias partes del mundo como: En Colombia se implementó la vigilancia estructural del puente colgante del viaducto César Gaviria Trujillo, ubicado en el Departamento de Risaralda [6].

Otro ejemplo es la vigilancia del puente Tamar cerca de Plymouth en el Reino Unido en el cual se monitorea su comportamiento dinámico y cuasi-estático y también las condiciones ambientales que afectan a este como la temperatura [2].

También podemos citar el ejemplo de una empresa en México, Ambher Ingeniería que ofrece diagnósticos y provee servicios de monitoreo y evaluación estructural de todo tipo de puentes a nivel mundial [7].

Tal y como ya fue descrito, el monitorear estructuras como puentes es de vital importancia, y las redes de sensores son una forma muy eficiente de realizarlo.

Por tal motivo, el presente proyecto surge de la necesidad de llevar un control del estado de los puentes además de los factores que afectan a su estructura, sean estos factores ambientales o deterioros por el tiempo de vida de los puentes, dando facilidades de monitorear el comportamiento de la estructura desde sitios remotos, sin necesidad de cables y a partir de ésto tomar medidas correctivas en el momento adecuado evitando desastres a futuro y realizar un seguimiento constante de la estructura para mantenerla en condiciones óptimas de funcionamiento.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Diseñar una red de sensores para monitorear la estructura de un puente en la ciudad de Guayaquil.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar las variables de medición del caso.
- Establecer que sensores son los más adecuados para el diseño de la red WSN y para el análisis de nuestros datos.

- Diseñar el sensor inalámbrico.
- Identificar las posiciones de los sensores.
- Establecer una topología de red adecuada que permita la correcta comunicación entre los nodos sensores.
- Encontrar el modelo de propagación más conveniente para usarse en nuestra red WSN.
- Simular en Matlab la comunicación de los nodos.
- Determinar el Gateway.
- Establecer qué tipo de enlace de acceso a la red es el más óptimo.
- Diseñar el Gateway de la red de sensores.

1.5 Metodología

Éste proyecto consiste en hacer un monitoreo constante de la estructura de un puente mediante una red de sensores inalámbricos la cual nos permitirá saber si existe algún cambio en la estructura del mismo para lo cual el procedimiento utilizado se lo realizará en varias etapas:

- 1). Primero, proceder a la investigación de parámetros importantes a ser medidos en los puentes, hay varios factores que son perceptibles a los sensores como son la deflexión, la temperatura y las vibraciones mecánicas.
- 2). Segundo, establecer los tipos de sensores que se usarán en la red, basados en la anatomía de este, debemos tomar en cuenta la fuente de alimentación que se va a usar ya sean: baterías, paneles solares, corriente alterna, etc.
- 3). Tercero, diseñar el sensor y dispositivo inalámbrico, el cual se lo conoce como mota. La mota nos va a permitir sensar los parámetros ya descritos anteriormente y tener una comunicación inalámbrica con nuestro Gateway.
- 4). Cuarto, establecer la ubicación de los puntos estratégicos donde se colocarán los sensores estableciendo sus coordenadas por medio de un GPS.

- 5). Quinto, luego de analizar el lugar a monitorear se ubicarán los sensores de acuerdo a una topología en malla.
- 6). Sexto, establecer el modelo de propagación más conveniente para nuestra red y simular en Matlab la comunicación entre todos los nodos.
- 7). Determinar el Gateway y tipo de enlace inalámbrico a usarse, en nuestro diseño se lo realizará por medio del protocolo Zigbee. Los datos recolectados serán enviados a través de los nodos sensores al Gateway el mismo que enviará dicha información a una PC o a la nube.

1.6 Alcance

El proyecto tiene como finalidad analizar y monitorear los cambios de la estructuras de un puente: vibraciones mecánicas y temperatura mediante una red WSN.

Una vez obtenido los resultados se podrá promover el desarrollo de una planificación para un correcto mantenimiento, rehabilitación y administración de las estructuras de puentes a fin de prever posibles fallas que puedan ocasionar accidentes en dichas estructuras, tomar medidas de seguridad para eventos sísmicos o cambios ambientales que provoquen comportamientos extraños en los puentes.

Se podría incluir muchos factores de medición como la humedad, y la corrosión que puede presentar la estructura debido al nivel de salinidad donde éste se encuentre. Otro parámetro importante sería conocer el tipo y peso de carga que presente el puente al momento de producirse cambios en la estructura de los puentes, incluyendo muchos más sensores que permitan adquirir esta información [8].

Una forma de prevención para las personas que usan éstos puentes es la creación de una aplicación en Android siendo ésta gratuita, la cual serviría para mantener informada en tiempo real a la población sobre el estado de los

puentes. Especialmente al momento de producirse eventos sísmicos o cambios climáticos extremos, ya que ésta aplicación podría salvar muchas vidas.

La escalabilidad que presenta este proyecto es de vital importancia, ya que puede ser utilizado en cualquier puente del país sin importar el tamaño del mismo.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE.

Luego de analizar la problemática en el Capítulo 1, se determinó los objetivos del proyecto, por este motivo es necesario profundizar en ciertas temáticas antes de llevar a cabo el diseño del proyecto. En este contexto, en el capítulo a continuación se procederá a realizar un estado del arte de “Smart Cities” y de las redes de sensores inalámbricos (WSN).

2.1 Smart Cities

“Durante gran parte del siglo XX, la idea de que una ciudad pudiera ser inteligente era una ficción que fue representada en los medios de comunicación populares, pero de repente con la proliferación masiva de pequeños dispositivos de cálculo, con un mínimo de inteligencia y capacidad para ser embebidos, la perspectiva de que una ciudad podría llegar a ser inteligente, sensible, incluso, se está convirtiendo en la nueva realidad” [9].

Una Smart City es aquella ciudad que emplea las TIC con el objetivo de que sus infraestructuras críticas y sus servicios públicos, sean más interactivos y eficientes, y para brindar soluciones en donde puedan interactuar los ciudadanos con los elementos de la urbe.

Gracias a los avances tecnológicos actualmente se puede pensar en “Ciudades Inteligentes” las cuales utilizan Redes de Sensores Inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN) distribuidas de manera inteligente, las cuales son muy accesibles en el mercado de hoy, gracias a su fácil instalación y mantenimiento, para mejorar la calidad de vida de las personas dando una facilidad de acceso a todo tipo de información y tomando decisiones eficazmente [10] [11].

Smart City consta de una plataforma digital con múltiples participantes (administraciones, empresas y ciudadanos), con redes de sensores que ofrecen una respuesta en todo momento [11], en la Figura 2.1 se muestra una infografía de una ciudad inteligente basada en el internet de las cosas (IoT) [12].

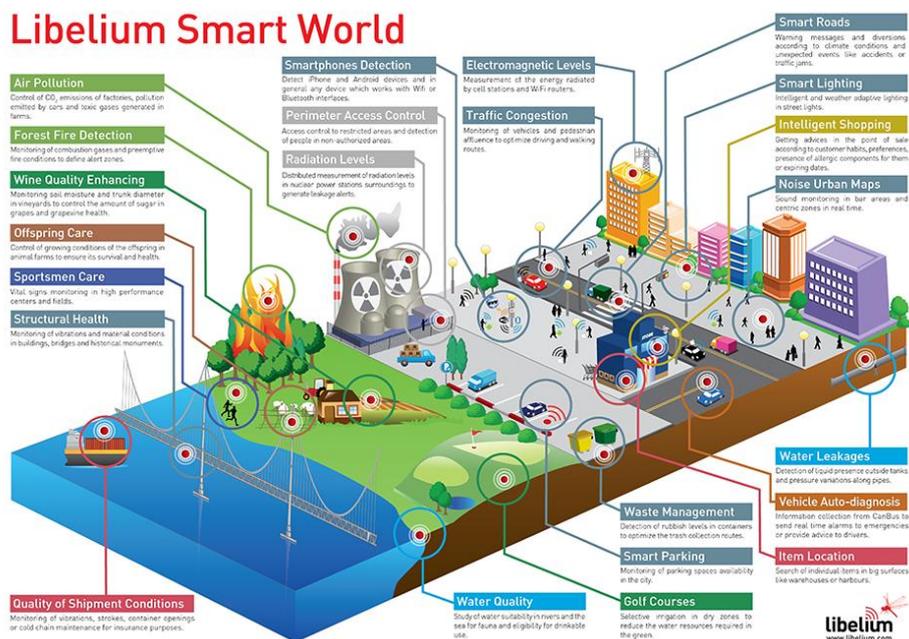


Figura 2.1: Libelium Smart World [12]

2.1.1 Características de las Smart Cities

El concepto de Smart City, de acuerdo con la página de las European Smart Cities [13], tiene las siguientes características como lo muestra la Figura 2.2.

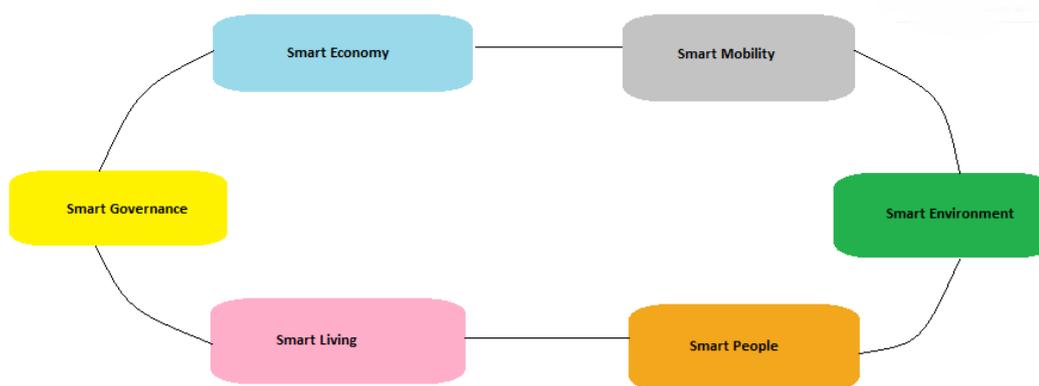


Figura 2.2: Características de las Smart Cities [13]

La figura 2.2 nos muestra las características que debe tener una ciudad para ser considerada una Smart City.

Una Smart City se basa en el uso intensivo de las TIC en diferentes escenarios y situaciones en una ciudad, constituyéndose en todos los casos las Tecnologías de Smart City [14].

Nuestro proyecto está basado principalmente en la característica de “Smart Mobility” como se muestra en la Figura 2.2, la cual está dirigida al transporte y la movilidad de las personas [14], además a la sostenibilidad y eficiencia en los sistemas de infraestructuras de la ciudad.

Así también en la característica de “Smart Living”, ya que esta hace referencia a la gestión inteligente de las infraestructuras de una ciudad y de sus servicios públicos lo que permite ofrecer una mejor calidad de vida a sus habitantes [14].

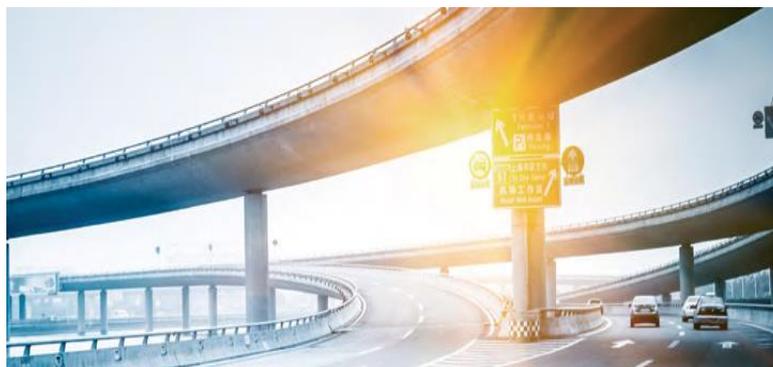


Figura 2.3: Smart Mobility [14].

2.2 Smart Cities en el mundo

Sin duda alguna la mayoría de países desarrollados ya han apostado por las ciudades inteligentes tales como: Estocolmo, Singapur, Rio de Janeiro, Málaga, Barcelona, Madrid, Santander, Buenos Aires, Marsella, Burgos, entre otras.

A continuación tenemos algunos ejemplos de Smart Cities en el mundo:

Barcelona:

Una de las ciudades top en Smart Cities a nivel mundial, esta ciudad cuenta con un Centro de Control y Monitorización en la Villa Olímpica, aquí se recoge la información en tiempo real de los servicios desplegados en materia de recarga de vehículos eléctricos, sensores para factores medioambientales, generación renovable, etc. [15]. Barcelona es considerada una de las ciudades pioneras y ejemplo de Smart Cities en el mundo. En la Figura 2.4 se aprecia la ciudad de Barcelona.



Figura 2.4: Barcelona-España

Santander:

Esta ciudad se ha centrado en la aplicación del concepto de Internet de las Cosas y de Internet del Futuro. El proyecto SmartSantander tiene como objetivo desplegar un total de 20.000 sensores, instalados en las ciudades de Belgrado, Guildford, Lübeck y Santander, con el fin de explotar una gran variedad de tecnologías. En Santander se realizará la mayor parte del despliegue con la instalación de 12.000 sensores [16].

Dentro de éste proyecto se presentan los siguientes servicios: monitorización medioambiental, gestión de parqueo, monitoreo de intensidad de tráfico y de riego de parques y jardines. En la Figura 2.5 se observa la ciudad de Santander.



Figura 2.5: Santander-España

Rio de Janeiro:

La ciudad brasileña mostrada en la Figura 2.6 tiene un Centro Inteligente de Operaciones que proporciona información de los sistemas e infraestructuras más importantes de toda la ciudad, de tal forma éste obtiene información en tiempo real de los servicios desplegados.

SmartCity Buzios es una ciudad que tiene como objetivo la conversión de la red energética en una más inteligente que cuente con contadores digitales y con una automatización que integre toda la generación de energía existente en la ciudad [17].



Figura 2.6: Rio de Janeiro-Brasil

2.3 Redes WSN

Una red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network) se define como una red de elementos llamados nodos quienes pueden recolectar la medida de ciertos factores (vibraciones, nivel de CO₂ en el ambiente, temperatura, humedad, etc.) del medio a analizarse y enviar dicha información tomada *in situ* a un nodo remoto, cuyo nombre se denomina nodo central, coordinador o pasarela, y este a su vez a través de un enlace inalámbrico transmitir a una estación de procesamiento. Estos nodos pueden estar ubicados en puntos fijos o encontrarse en movimiento [18].

2.3.1 Componentes

Los elementos que componen una red de sensores inalámbricos son: nodos sensores, nodo central o Gateway y la estación base. En la Figura 2.7 se observa un esquema de los componentes de una red de sensores inalámbricos:

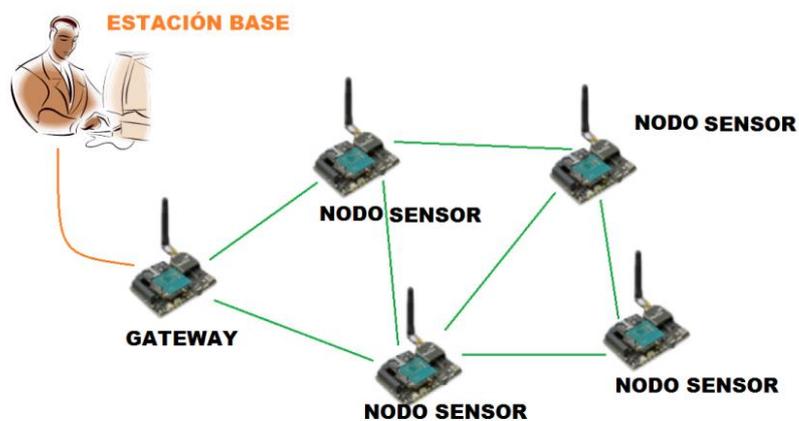


Figura 2.7: Componentes de las WSNs

En la Tabla 1 se detallan las características más relevantes de cada uno de los componentes de las redes de sensores inalámbricos:

Nodos Sensores	Se compone de una mota y sensores conectados inalámbricamente entre sí, recolectan la información del medio.
Nodo Central o Gateway	Nodo en el cual se interconectan los demás nodos, envía la información a la nube.
Estación Base	Es donde llega la información y donde se va a almacenar ya sea la web o un ordenador.

Tabla 1: Características de los componentes de las WSNs[19]

2.3.2 Topología de Red

Podemos encontrar tres casos para la topología de red de los nodos sensores:

Redes en estrella

En la topología en estrella (Figura 2.8), el nodo central está rodeado de dispositivos. Puede soportar hasta 6000 dispositivos, es de fácil configuración. En esta topología hay ciertas desventajas: si el nodo central tiene alguna falla técnica y no trabaja, entonces toda la red falla, debido a que toda la información pasa por el nodo central de la estrella. Podríamos decir que ésta topología no ofrece una transmisión fiable [20].

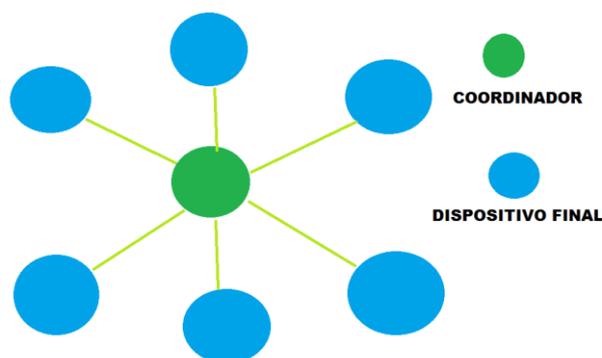


Figura 2.8: Red en Estrella

Redes Mesh o malla

Es un sistema *multi-salto* en el que todos los nodos son idénticos, además de routers. En esta topología según se muestra en la Figura 2.9 la información viaja de nodo a nodo desde la fuente de destino. Cada nodo puede enviar y recibir información de otro nodo y del nodo coordinador o puerta de enlace. En este tipo de red los nodos pueden enviar información entre ellos a diferencia de la configuración estrella en el que los nodos solo se comunican con el coordinador o puerta de enlace [21].

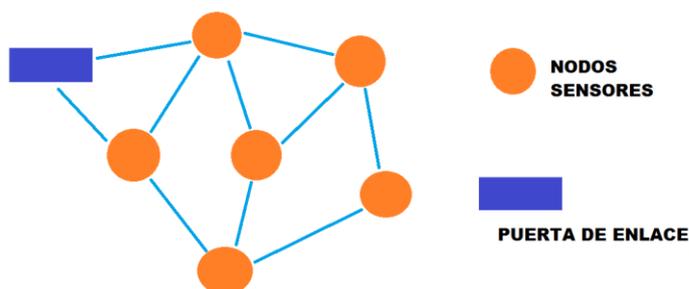


Figura 2.9: Red en Malla

Redes híbridas

Esta topología mostrada en la Figura 2.10 mezcla dos características: la simplicidad de la topología en estrella y capacidad de cubrir grandes terrenos y corrección de fallas de comunicación de nodos de la topología en malla. Se compone de una red en estrella alrededor de routers pertenecientes a una red en malla, esto nos da como resultado una red amplia además de la capacidad de corregir fallas en dichos nodos. A su vez éstos routers buscarán un destino o puerta de enlace la que comunicará la red de sensores con otra red como el Internet o la nube. Los nodos finales se conectan con los routers cercanos para ahorrar energía [21].

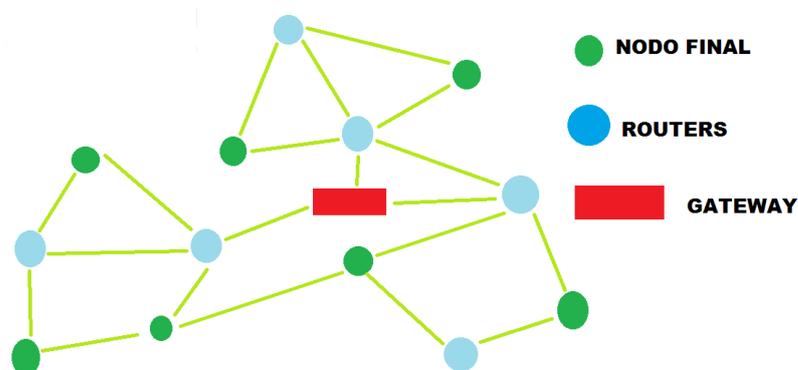


Figura 2.10: Red Híbrida

En Estrella		MALLA	HIBRIDA
VENTAJAS	DESVENTAJAS	VENTAJAS	VENTAJAS
De fácil configuración	Si un nodo falla toda la red falla	Los nodos se pueden comunicar entre ellos	Capacidad de cubrir grandes terrenos
	No ofrece transmisión fiable		Capacidad de corregir fallas en los nodos

Tabla 2: Ventajas y desventajas de las topología de red [20][21]

En la tabla 2 se detallan las ventajas y desventajas de cada topología, basados en esto, en nuestro proyecto utilizaremos una topología de red híbrida debido a que ésta mezcla las características de la topología estrella y malla, la topología híbrida nos permite que los nodos se comuniquen y envíen información entre sí y a su vez con el Gateway, además nos brinda la capacidad para cubrir grandes áreas y corregir fallas en los nodos.

2.4 Tecnología Zigbee

ZigBee es un conjunto de protocolos para la comunicación inalámbrica que se utiliza para la radiodifusión, está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal [22].

Se basa en dispositivos inalámbricos que operan en la banda ISM teniendo muchos usos sean estos industriales, científicos y médicos (868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz) tiene una modulación en espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) la cual se conoce también como acceso múltiple por división de código en secuencia directa (DS-SS) [18].

El protocolo Zigbee presenta las siguientes características:

- Con aplicaciones WPAN
- Bajo costo
- Bajo consumo
- Instalación fácil y barata
- Redes flexibles y extensibles

La tabla 3 nos muestra las características del protocolo Zigbee:

Prestaciones	ZigBee 802.15.4
Frecuencia de radio (GHz)	0.868; 0.915; 2.4
Consumo de corriente (mA)	30
Nº de nodos por master	65000
Duración de la batería	12 y 48 horas
Tipo de datos	Vídeo, audio, gráficos, películas, ficheros
Características más importantes	Fiabilidad, bajo consumo y bajo coste
Complejidad	Sencillo

Tabla 3: Características de Zigbee

En la Tabla 3 se indican las principales características del protocolo Zigbee, en base a éstas ventajas se optó por la elección de esta tecnología debido a su baja capacidad de transmisión, alrededor de 250 Kbps, lo que nos brindará un sistema de bajo costo, además de ser un protocolo sencillo lo que no permite poder implementarlo en cualquier sistema de microcontroladores de 8 bits.

Otra ventaja es su bajo consumo de energía lo que nos permite que la batería a usarse tenga un tiempo de vida más prolongado.

2.4.1 Regulación

Como ya se estableció anteriormente según las características del protocolo Zigbee este opera en las bandas de 868 Mhz, 915 Mhz y 2.4 Ghz, debido al “Plan Nacional de Frecuencias” [23] que rige en el Ecuador, las bandas de 868 y 915 Mhz están atribuidas al servicio móvil y no son de uso libre en el país, la banda de 2.4Ghz está destinada para el uso de aficionados es decir es libre ya que no necesita licencia, por éste motivo utilizaremos esta frecuencia en nuestra red de sensores inalámbricos. En la figura 2.11 se muestra la máscara espectral de Zigbee.

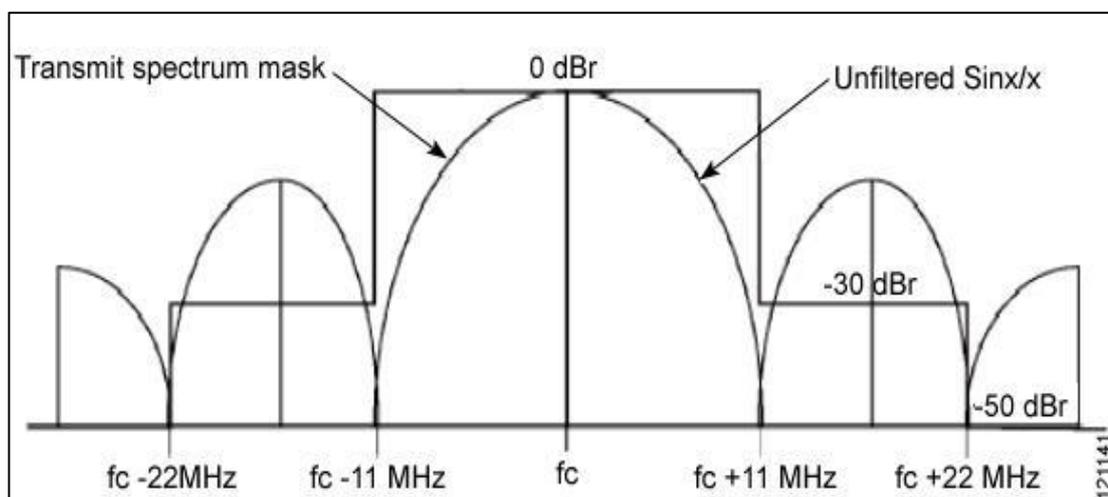


Figura 2.11: Máscara de Red Zigbee

2.4.2 Características Técnicas

Frecuencias de Operación	868Mhz-915Mhz-2.4Ghz
Velocidad de Transmisión	20,40, 250[Kbps]
Sensibilidad	-92dBm, -85dBm
Alcance Máximo	1-300m
Potencia	1-2mW
Ancho de Banda	0.6Mhz
Dispositivos conectados	264

Tabla 4: Características técnicas protocolo Zigbee

En la tabla 4 se describen las características técnicas del protocolo Zigbee, sus frecuencias de operación con sus respectivas velocidades de transmisión además de la potencia, el alcance máximo o cobertura que nos brinda y otras características mencionadas.

2.5 Proyectos hechos con WSN

Alrededor del mundo existen varias infraestructuras civiles o puentes equipados con un Sistema de Monitoreo de salud estructural implementados con redes de sensores inteligentes tales como:

El puente Tsing Ma (Figura 2.12) ubicado en Hong Kong se construyó en mayo de 1997, es el noveno puente colgante más largo del mundo, consta con aproximadamente 350 canales de sensores que monitorean en tiempo real variables estáticas y dinámicas, evaluando en forma continua las condiciones y los estados operacionales del puente para controlar su respuesta dinámica frente a excitaciones como el tráfico, el viento y sismos.



Figura 2.12: Puente Tsing Ma-Hong Kong

El puente Stonecutters (Figura 2.13) ubicado en Hong Kong, fue construido en Abril del 2004, una de las principales dificultades que se presentó en éste puente es que en la región de Hong Kong con frecuencia soplan vientos fuertes y tifones. En octubre de 2002 se colocó un mástil de 50 metros en el lugar para medir la velocidad, la dirección de los vientos y la turbulencia en la zona y se tomaron datos a tiempo real hasta enero de 2004 [24], esto para tomar medidas antes de que se dé por inaugurado dicho puente, luego de su construcción para prever daños a futuro, se implementó una red la cual está constituida de 1781 sensores instalados, con el objetivo de monitorear de manera continua la estructura y emitir alertas tempranas cuando ésta esté sujeta a cargas excesivas causadas por el tráfico, además de factores climáticos o naturales como el viento y posibles terremotos.



Figura 2.13: Puente Stonecutters-Hong Kong

Un proyecto que se lleva actualmente en San Francisco, California, es el de evaluar las vibraciones del puente Golden Gate (Figura 2.14). Una placa de sensores se coloca junto con un acelerómetro a un convertidor ADC de 16 bits, la placa de sensores se conecta a una Mica Mote y se coloca en el puente para realizar el análisis de movimiento debido al paso de los automóviles. Un conjunto de 60 nodos sensores posicionados manualmente en el puente se conectan entre sí y envían a un control central que almacena y procesa los datos obtenidos [25].



Figura 2.14: Puente Golden Gate-Estados Unidos

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA.

En este capítulo se procederá a indicar la metodología y todas las herramientas necesarias para la simulación de nuestro proyecto, también datos referentes al escenario de nuestra red como los puntos en donde se ubicaran las motas.

Se detallarán algunas expresiones matemáticas para poder definir algunos parámetros necesarios para la simulación de la red en la plataforma de Matlab correspondientes al siguiente capítulo. Se indica también el algoritmo utilizado para el proceso de la simulación de la conectividad de los nodos sensores.

3.1 Descripción del Escenario

El escenario donde ubicaremos la red de sensores inalámbricos en nuestro proyecto es un puente el cual tiene un área aproximada de 3172 m² aproximadamente, dicho puente se encuentra con cierta vegetación a su alrededor además de edificios de mediana altura, sobre el mismo hay una gran afluencia de tránsito tanto de transporte urbano como también de vehículos livianos que se movilizan por su estructura constantemente, está construido de hormigón y acero y posee un total de 8 pilares o bases en las cuales colocaremos los 15 nodos sensores. En la Figura 3.1 se muestra un bosquejo del escenario de nuestro proyecto y la ubicación y número de sensores utilizados.

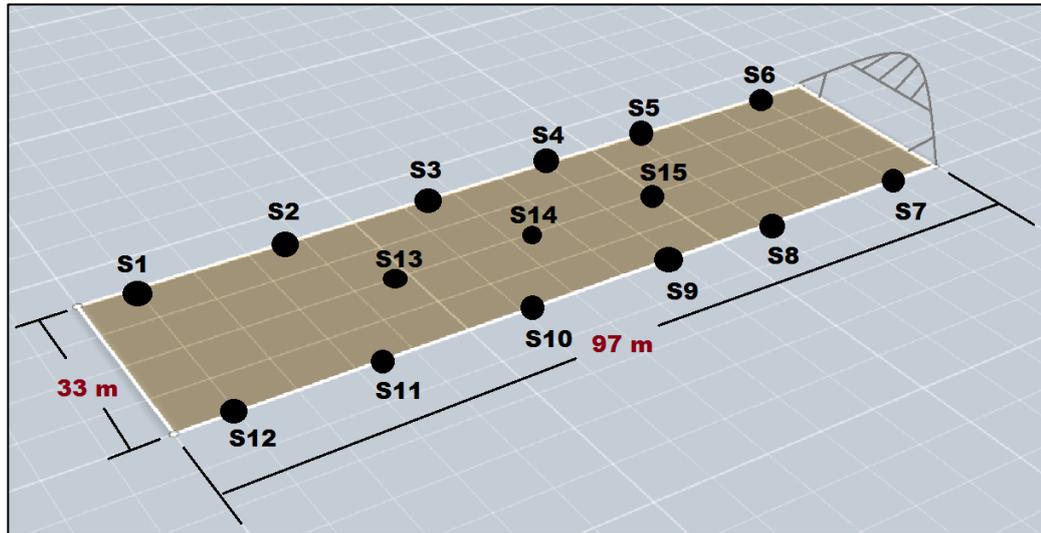


Figura 3.1: Ubicación de Sensores en el escenario

3.2 Metodología

Para el diseño de nuestro proyecto se procedió a hacer un estudio del escenario verificando primero que factores podrían afectar al puente, para lo cual pudimos darnos cuenta que debido al gran tráfico que éste soporta diariamente su estructura podría tener problemas físicos ya sean daños en las vigas y pilas o en un caso peor la caída del mismo debido al peso que soporta.

Para la topología física de la red se estableció en donde se colocarán los sensores, en nuestro caso se decidió que serían ubicados en las pilas o bases del puente, usando un GPS se procedió a la toma de las coordenadas de los puntos o posición de los sensores. La Tabla 5 nos muestra las coordenadas del posicionamiento de los sensores de la red.

X	Y	Z
622443	9758339	4
622456	9758333	4
622473	9758327	5
622488	9758323	5
622502	9758318	6
622517	9758315	6
622509	9758285	6
622496	9758289	5
622481	9758293	5
622465	9758299	4
622452	9758303	4
622437	9758308	4
622460	9758316	4
622476	9758311	5
622490	9758306	5

Tabla 5: Coordenadas de los sensores

Luego escogimos el modelo de propagación el cual nos va a permitir conocer cuál es la potencia de la señal al comunicarse entre nodos, de acuerdo al escenario antes mencionado se escogió el Modelo de Propagación de Shadowing al encontrarnos en un espacio libre, para la pérdida por absorción de la señal o Absorption se estableció un valor de 10 dB dicho valor estimado al pasar la señal a través de estructuras reforzadas con el metal.

La simulación de la comunicación de los nodos sensores o motas se la realizará en la plataforma Matlab, luego de haber recolectado todos los parámetros necesarios para realizar la verificación de la conectividad de los nodos sensores como: las coordenadas, la distancia, la potencia del receptor, la potencia de ruido y el SNR.

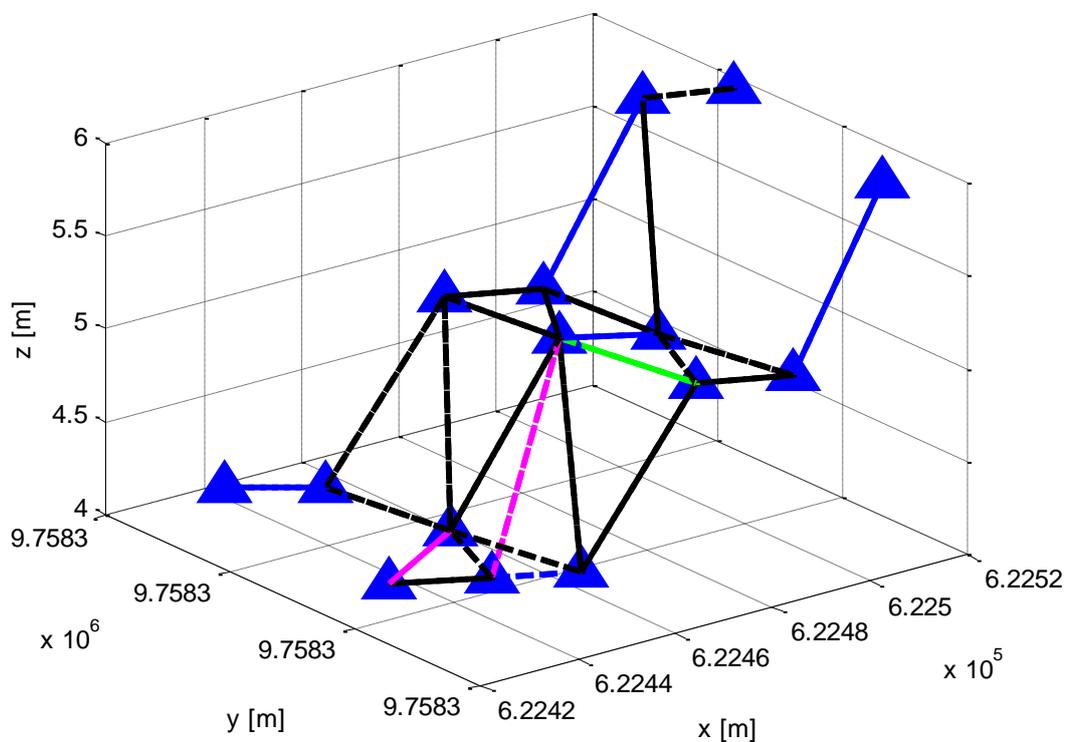


Figura 3.2: Ejemplo de un escenario de Simulación en Matlab

3.3 Formulación Matemática

La potencia efectiva de transmisión es la potencia transmitida por el transmisor en dirección del receptor. El presupuesto de enlace de una comunicación entre transmisor y receptor se detalla por medio de la ecuación a continuación:

$$Pr = Pt + Gr + Gt + L \quad (3.1)$$

Donde:

Pr= Potencia del receptor en dBm

Pt= Potencia del transmisor en dBm

G_r = Ganancia de la antena del receptor en dB

G_t = Ganancia de la antena del transmisor en dB

L = Atenuación a 2450 Mhz en dB

El modelo de propagación permite conocer las pérdidas de la señal de acuerdo al tipo de escenario en el que nos encontremos, en este caso definiremos las ecuaciones respectivas para el Modelo de Propagación de Shadowing.

La atenuación del espacio libre puede ser calculada por medio de la ecuación a continuación:

$$L_{freeSpace} = -(20 \log d + 20 \log f - 27.5) \quad (3.2)$$

Donde:

$L_{freeSpace}$ = Atenuación de espacio libre en dB

d = Distancia en metros

f = Frecuencia en Mhz

En el caso de la frecuencia de Zigbee de 2.45 Ghz, la ecuación 3.3 quedará de la siguiente manera:

$$L_{freeSpace_{2450Mhz}} = -(20 \log d + 40.3) \quad (3.3)$$

La atenuación para el modelo de propagación de absorción de la señal "Shadowing" se deriva de la ecuación 3.2 con la adición de varios factores empíricos:

$$L_{2450Mhz} = -(10\gamma \log d + L_{(freeSpace_2450Mhz)} [1\ metro] + L_{Absorption}) \quad (3.4)$$

Donde:

γ = Exponente de pérdida de propagación

$L_{absorption}$ = Atenuación de la señal al atravesar paredes, puertas, etc. en dB

Por ejemplo para un ambiente exterior con edificios [26] γ sería igual a 4 y $L_{absorption}$ al atravesar estructuras reforzadas con metal sería igual a 10dBm. Usando estos valores, la ecuación 3.4 quedaría de la siguiente manera:

$$L_{2450Mhz_Outdoor} = -(40 \log d + 40.3 + L_{absorption}) \quad (3.5)$$

Capacidad de Canal

Para el cálculo de la capacidad de canal, que es la máxima información transmitida a través de un canal tenemos la siguiente ecuación:

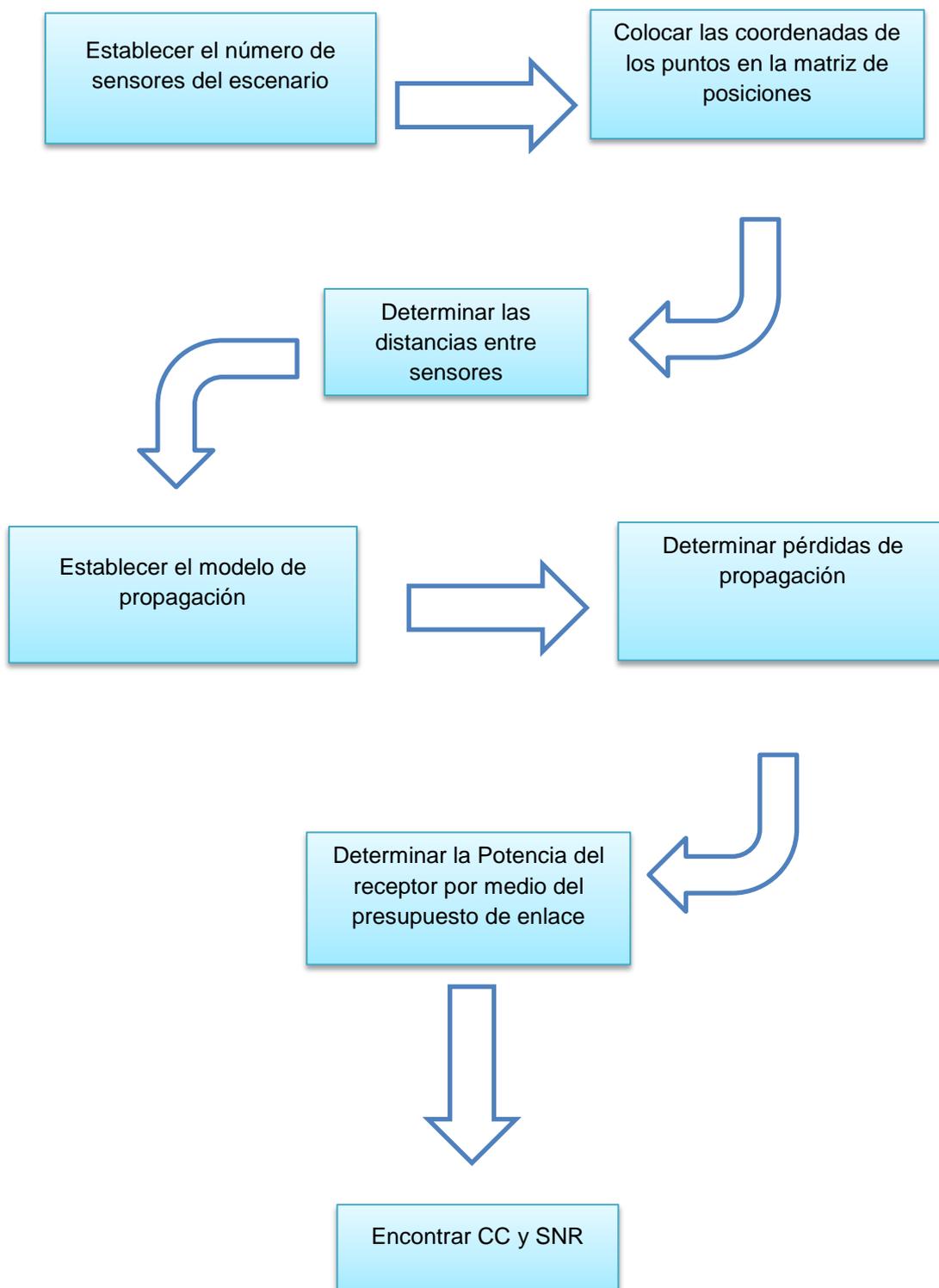
$$CC = BW \cdot \log_2(1 + SNR) \quad (3.6)$$

Relación de Señal a Ruido

Para el cálculo de la relación señal a ruido (SNR), se tiene la siguiente ecuación:

$$SNR = Prx_{(dBm)} - Ptx_{(dBm)} \quad (3.7)$$

3.1 Algoritmo



CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En éste capítulo se realizará la simulación de la conectividad de la red para las diferentes potencias de ruido, además se procederá a describir la ubicación geográfica del escenario donde se diseñó la red de sensores. Seguido de esto se realizará la verificación la correcta simulación de la red en la plataforma Matlab por medio de las gráficas de función de distribución acumulada

4.1 Localización Exacta del Escenario

El despliegue de nuestra red de sensores inalámbricos se realizó en un puente ubicado en el centro de la ciudad de Guayaquil, el cual está localizado sobre un brazo de mar. En base a las coordenadas obtenidas por medio del GPS dicho puente se encuentra ubicado en los siguientes puntos: (Latitud: 2° 11'10.7"S y Longitud: 79°53'53.4"O)



Figura 4.1: Localización del Escenario

En la Figura 4.1 se aprecia la localización del puente donde se ubicara la red de sensores, el mismo que se encuentra sobre el Estero del Salado.

4.2 Diseño de la Mota

Para nuestro proyecto se procedió al diseño de la mota usando los siguientes elementos:

- Placa Arduino UNO R3 (Figura 4.2), la cual está basada en el microcontrolador ATmega328P, el mismo que se eligió ya que nos permite una facilidad de conexión de múltiples microcontroladores, además es un hardware de fácil uso ya que tiene un lenguaje de programación libre.

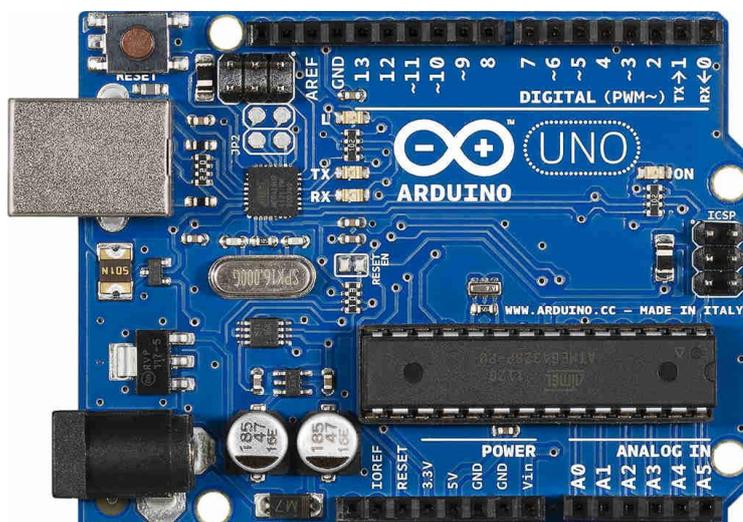


Figura 4.2: Arduino Uno

- Módulo Xbee Pro Series (Figura 4.3) el cual se escogió ya que nos permite diseñar redes malladas y más robustas a diferencia del Xbee series 1 también nos brinda un bajo costo y menos consumo de batería. El módulo XBee-PRO 802.15.4 presenta una potencia de salida de 18dBm y la sensibilidad del receptor es de -100dBm . Esto le permite operar a más de 1km en espacios abiertos, y hasta 300m en espacios urbanos.



Figura 4.3: Módulo Xbee Pro

- Antena de 5dBi de potencia la cual nos permitirá una mejor conectividad entre todos los sensores.
- Un sensor de vibración SW-420 y uno de temperatura DHT-11, para las mediciones de los factores antes mencionados.

En la Figura 4.4 se muestran los sensores antes descritos a usarse y la antena.

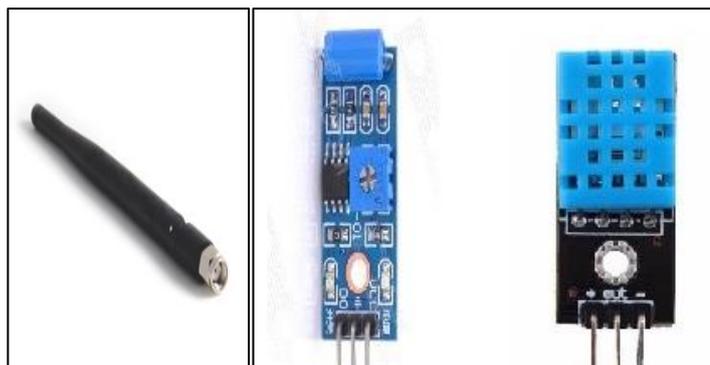


Figura 4.4: Antena, Sensor DHT-11 y Sensor SW-420

- Panel Solar, este nos permitirá captar la energía para la alimentación de nuestra fuente o batería, el mismo que irá conectado a la placa arduino a través de la “arduino solar charger shield”, se escogió un panel solar ya que nos brinda energía sin costo y es de fácil acceso sin necesidad de usar cables conectados a una fuente de corriente alterna.
- Una batería LIPO, se la escogió ya que es una batería recargable que tiene gran capacidad de almacenamiento de energía a pesar se su tamaño reducido, lo cual nos permite movilidad y fácil acceso, ésta batería es recargada por medio de un panel solar los cuales van conectados a una placa llamada “ARDUINO SOLAR CHARGER SHIELD” [27].
- La Solar Shield para Arduino es una placa de sistema de alimentación que permite trabajar al Arduino de forma autónoma ya que por medio de la batería LIPO que éste lleva conectada puede disponer de energía constantemente la cual se recarga por medio de un panel solar [28].

En la Figura 4.5 se observan la “Arduino Solar charger shield” en la que se encuentran conectados el panel solar y la batería lipo.



Figura 4.5: Arduino Solar Charger Shield, batería LIPO y panel solar

4.3 Gateway

El Gateway es la puerta de enlace o salida de nuestra información recolectada hacia la nube o a una estación base encargada del análisis de los resultados de las mediciones obtenidas, para el diseño de nuestro Gateway se escogió un nodo sensor que tendrá el siguiente diseño:

- Un arduino, el mismo que fue descrito anteriormente.
- Una fuente de alimentación en éste caso la batería Lipo.
- Un panel Solar y un solar charged shield para arduino.

Y a diferencia de los nodos sensores éste tendrá conectividad a internet por medio de un módulo Wi-Fi RN-XV que se describe a continuación:

El módulo RN-XV nos permite cambiar de una arquitectura 802.15.4 a una plataforma basada en el estándar TCP/IP, se escogió ya que para conectarnos a Wi-Fi solo necesitamos cambiar el módulo Xbee por éste, sin tener que cambiar el hardware. Con éste radio Wi-Fi puede realizar conexiones HTTP y enviar información a los servidores Web y FTP [29]. En la Figura 4.6 se muestra el módulo Wi-Fi RN-XV conectado a la placa arduino.

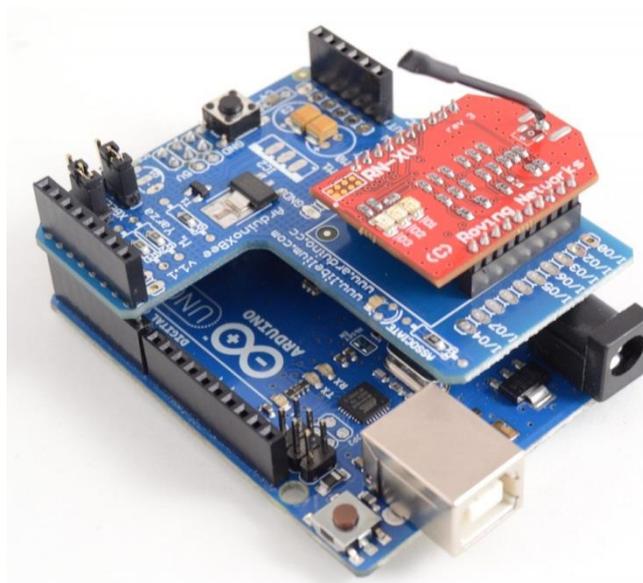


Figura 4.6 Módulo de comunicación Wi-Fi RN-XV

En la figura 4.7 y 4.8 se muestran la vista lateral y la superior del diseño de la mota respectivamente, además se adjunta el esquemático y diseño de la mota en los anexos 1 y 2 respectivamente:

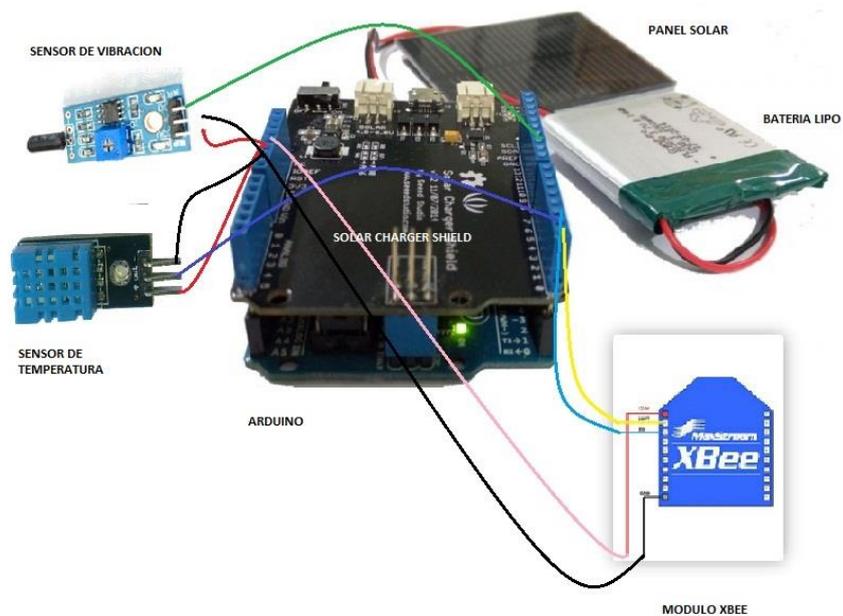


Figura 4.7: Vista Lateral de la Mota

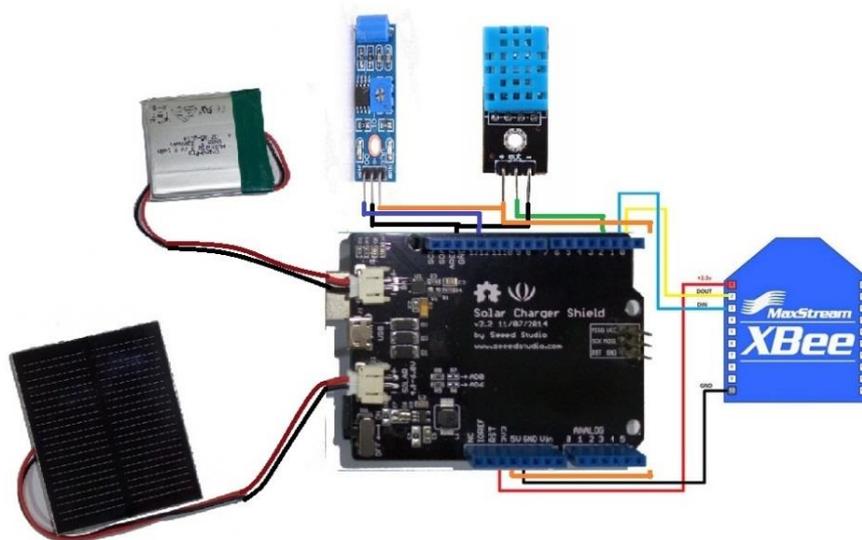


Figura 4.8: Vista superior del diseño de la Mota

4.4 Parámetros de configuración

De acuerdo al diseño de la mota según se describió en el inciso anterior cada nodo sensor tendrá las siguientes características las cuales se describen a continuación en la Tabla 6:

Potencia de Transmisor	18dBm
Sensibilidad Mínima	-85dBm
Ganancia de la antena transmisora	5dBm
Ganancia de la antena receptora	5dBm
Alcance Máximo	300m
Labsorption	10dBm

Tabla 6: Parámetros de Configuración de la mota

En la Tabla 6 se tiene los parámetros de configuración de cada nodo sensor, la potencia de transmisión, las ganancias de las antenas de recepción y transmisión, también se tiene el alcance máximo que se tendrá entre cada nodo sensor y las perdidas de absorción por el paso de la señal a través de estructuras reforzadas con metal la cual se estimó basándose en el escenario escogido.

4.5 Posiciones de los sensores

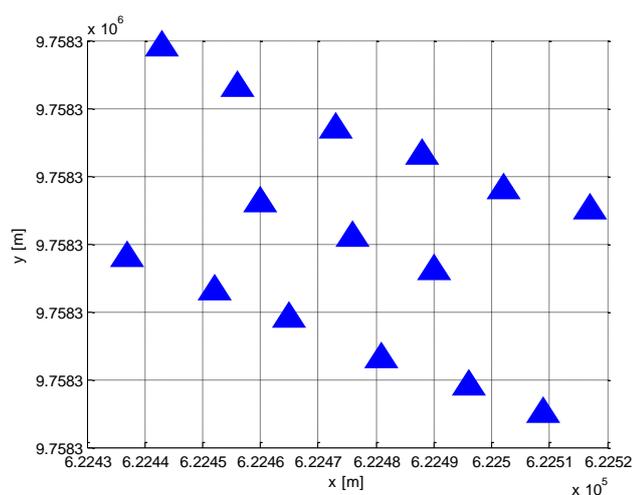


Figura 4.9: Posiciones de los sensores

En la Figura 4.9 se observa la posición de los nodos sensores en el eje X y Y.

4.6 Resultados

Se realizó la simulación de la conectividad de nuestra red en la plataforma Matlab basados en el código que se adjunta en el Anexo 3, para 3 escenarios de diferentes potencias de ruido:

- Pnoisemax=-75dBm
- Pnoisemedio=-84dBm
- Pnoisemin=-93dBm

La Tabla 7 nos muestra los valores establecidos en nuestra simulación para cada velocidad de transmisión respecto a la relación de señal a ruido y los colores de las gráficas que indican la velocidad de acuerdo a su SNR:

Rb[Kbps]	SNR[dBm]	Color de línea
250	3	Morado
500	6	Verde
1500	9	Negro
2000	12	Azul

Tabla 7: Datos establecidos para la simulación

Primer Escenario

Nuestro primer escenario de simulación mostrado en la Figura 4.10 se lo realizó para una potencia de ruido de -75dBm siendo esta la máxima de los tres escenarios a analizar:

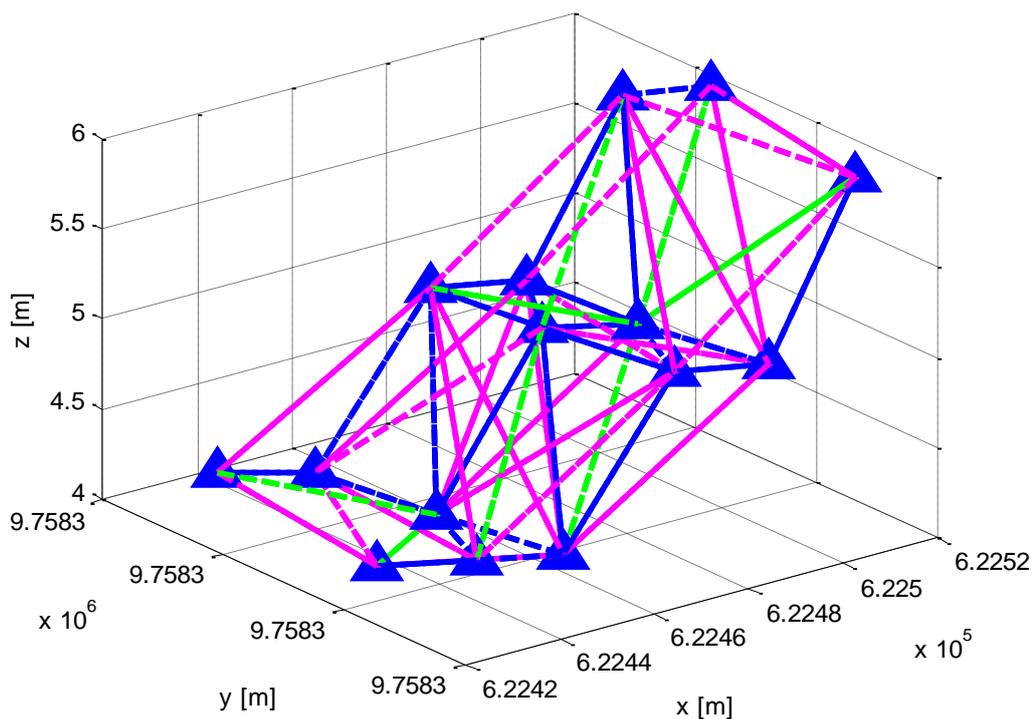


Figura 4.10: Simulación para $P_{\text{noise}}=-75\text{dBm}$

En la figura 4.10 se observa que la comunicación de los nodos sensores es exitosa, ya que todos establecen comunicación entre sí como lo muestran las gráficas de colores y ninguno ha quedado aislado, también se puede ver que las velocidades de transmisión (R_b) varían entre 250Kbps líneas de color morado, 500Kbps líneas de color verde y 2000Kbps líneas de color azul.

Segundo Escenario

Nuestro segundo escenario como mostrado en la Figura 4.11 se lo realizó para una potencia de ruido de -84dBm siendo este el valor medio de nuestros tres escenarios analizados:

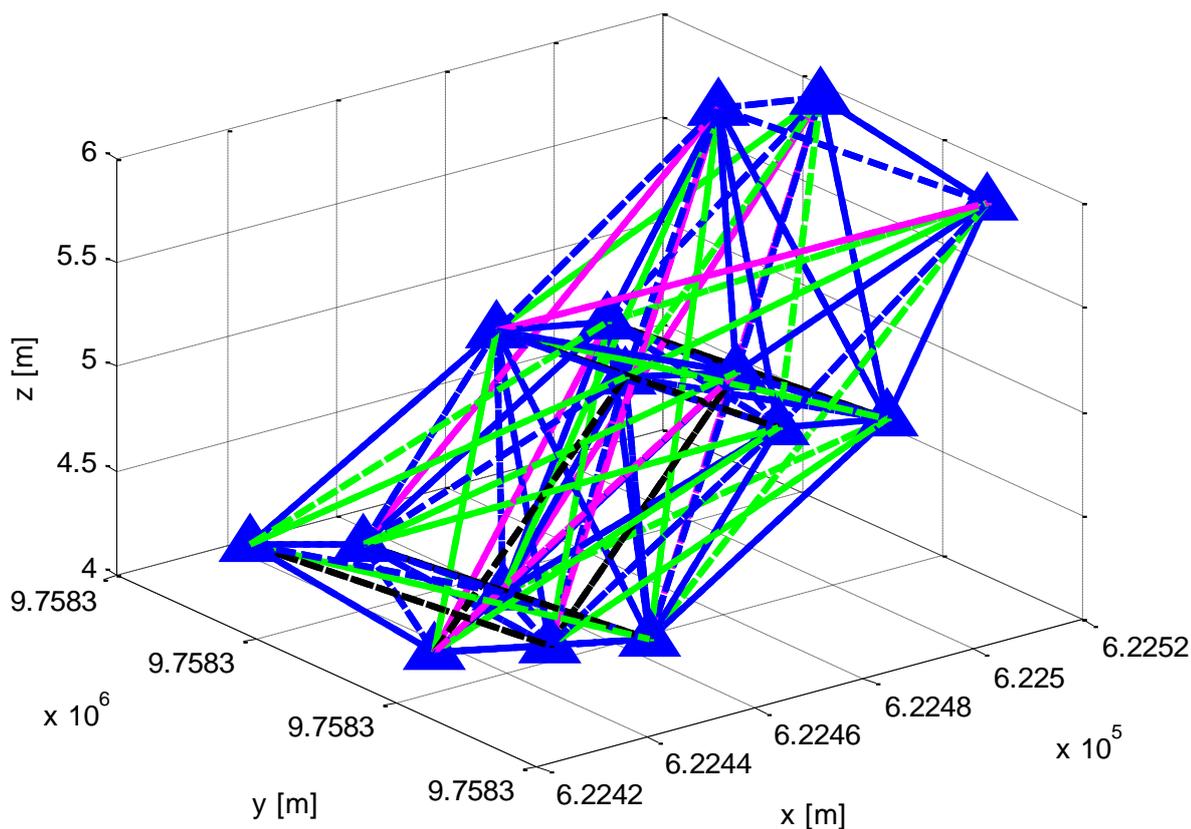


Figura 4.11: Simulación para Pnoise=-84dBm

En la Figura 4.11 se observa que la comunicación de los nodos sensores es exitosa ya que todos establecen comunicación entre sí y ninguno ha quedado aislado, también se puede ver que las velocidades de transmisión (R_b) varían entre 250Kbps líneas de color morado, 500Kbps líneas de color verde, 1500Kbps líneas de color negro y 2000Kbps líneas de color azul, pudiéndonos dar cuenta que las velocidades de 500Kbps líneas de color verde y 2000Kbps líneas de color azul son más frecuentes.

Tercer Escenario

Nuestro tercer escenario mostrado en la Figura 4.12 se lo realizó para una potencia de -93dBm , siendo ésta la mínima entre los tres escenarios analizados:

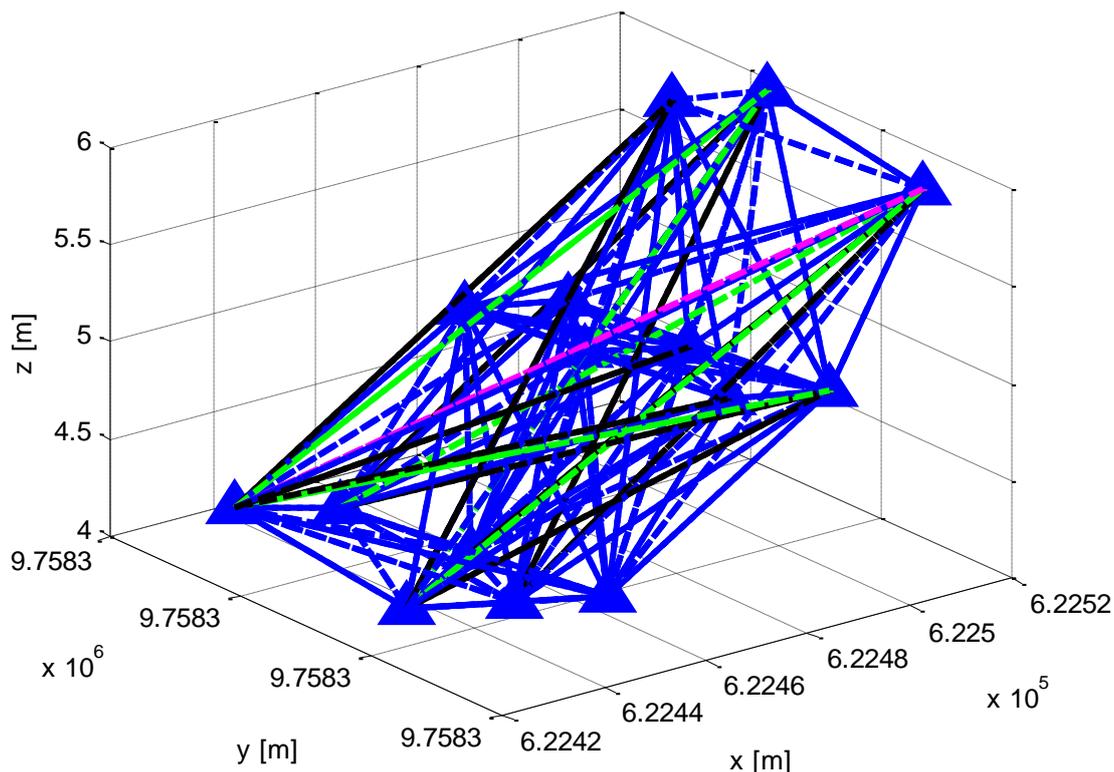


Figura 4.12: Simulación para Pnoise=-93dBm

En la Figura 4.12 se observa que la comunicación de los nodos sensores es exitosa ya que todos establecen comunicación entre sí y ninguno ha quedado aislado, también se puede ver que las velocidades de transmisión (R_b) varían entre 250Kbps líneas de color morado, 500Kbps líneas de color verde, 1500Kbps líneas de color negro y 2000Kbps líneas de color azul, pudiéndonos dar cuenta que la velocidad de 2000Kbps líneas de color azul es más frecuente, es decir los nodos se comunican a mayor velocidad debido a que la potencia de ruido es mínima y su relación señal a ruido es mayor.

Gráficas de Función de Distribución Acumulada

A continuación en la Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se mostrarán las gráficas de la función de distribución acumulada CDF para cada caso y realizar la comparación de las mismas, para verificar nuestros resultados obtenidos en nuestra simulación para cada potencia de ruido analizada.

En la Figura 4.13 a continuación se tienen las gráficas de función de distribución acumulada para las velocidades de transmisión para cada potencia de ruido:

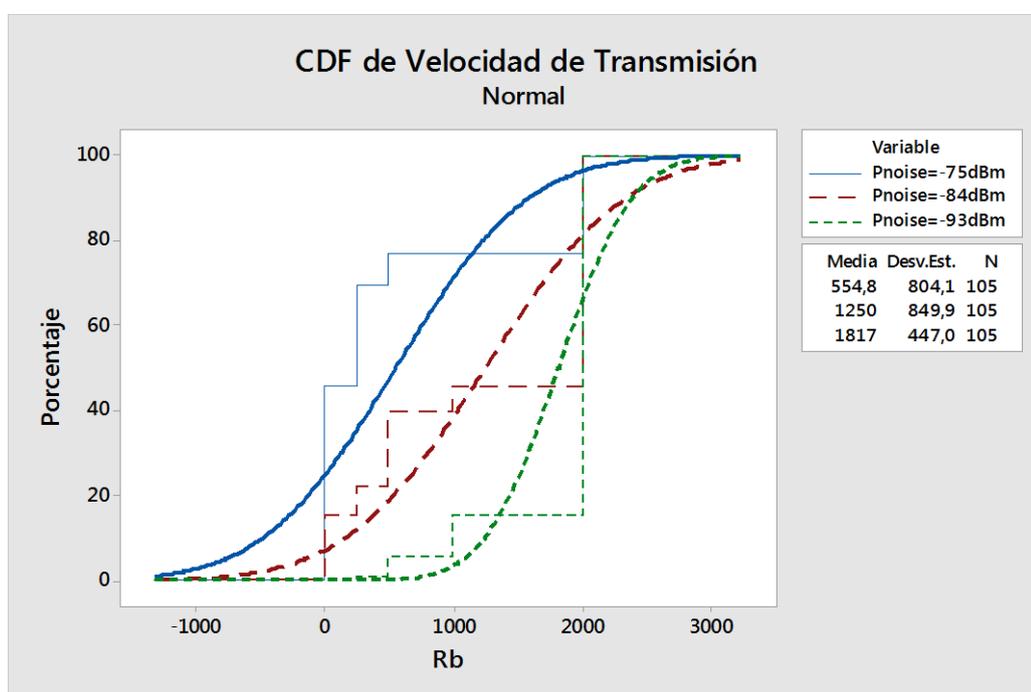


Figura 4.13: CDF para Velocidad de transmisión (Rb)

En la Figura 4.13 la gráfica color azul representa la velocidad de transmisión para la potencia de ruido de -75dBm, la gráfica roja la velocidad de transmisión para la potencia de ruido de -84dBm y la gráfica verde la velocidad de transmisión para la potencia de ruido de -93dBm. Se puede observar que para una potencia de ruido de -93dBm existen velocidades de transmisión mayores, tiene una media de 1817Kbps, es decir un SNR de 12dBm aproximadamente.

Para la potencia de ruido de -84dBm se tiene una media de velocidad de transmisión de 1250 Kbps, es decir un SNR de entre 6 y 9 dBm aproximadamente.

Para la potencia de ruido de -75dBm se tiene una media de velocidad de transmisión de 554.8 Kbps, es decir un SNR de 6dBm aproximadamente.

Con estos datos se puede concluir que para una potencia de ruido de -93dBm que es el caso mínimo en nuestros tres escenarios existe un mayor SNR lo que demuestra que la comunicación o conectividad entre los nodos sensores es más efectiva y nos permite una comunicación a mayor distancia

En la Figura 4.14 a continuación se tienen las gráficas de función de distribución acumulada para la capacidad de canal para cada potencia de ruido:

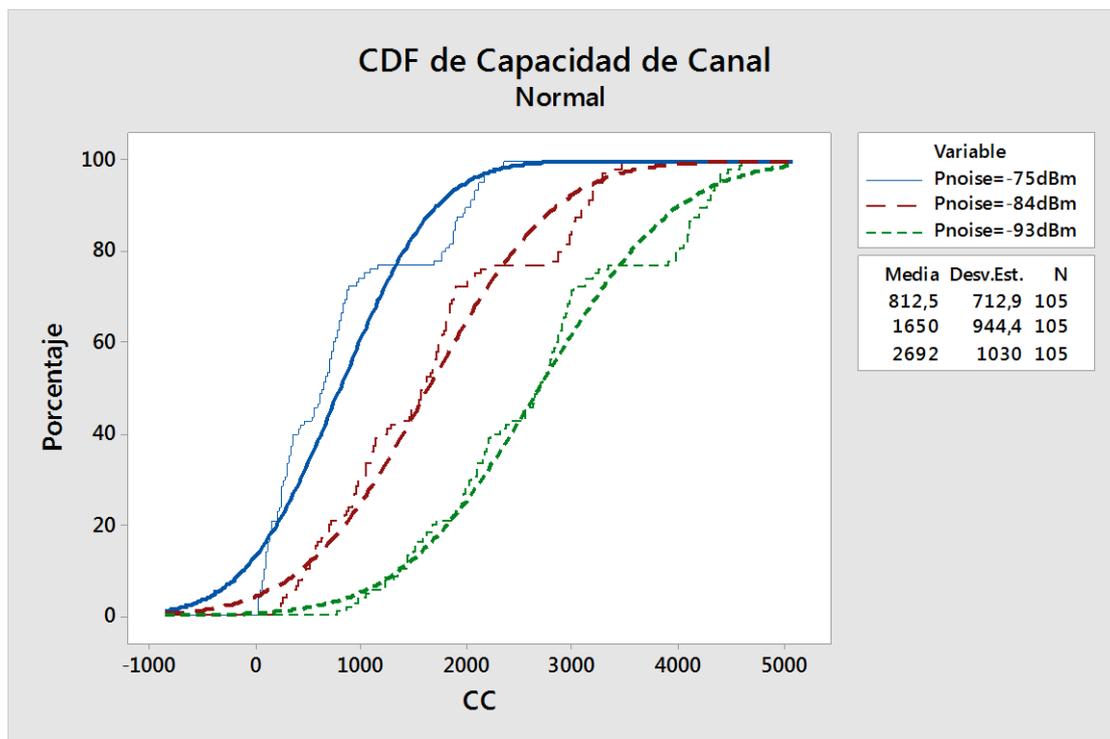


Figura 4.14: CDF para Capacidad de Canal (CC)

En la Figura 4.14 la gráfica color azul representa la capacidad de canal para la potencia de ruido de -75dBm, la gráfica roja la capacidad de canal para la potencia de ruido de -84dBm y la gráfica verde la capacidad de canal para la potencia de ruido de -93dBm. Se puede observar que para una potencia de ruido de -93dBm existen mayor capacidad de canal, tiene una media de 2692 Kbps.

Para la potencia de ruido de -84dBm se tiene una media de capacidad de canal de 1650 Kbps y una desviación estándar de 964.4.

Para la potencia de ruido de -75dBm se tiene una media de capacidad de canal de 812.5 Kbps y una desviación estándar de 712,9.

Con estos datos se puede concluir que para una potencia de ruido de -93dBm que es el caso mínimo en nuestros tres escenarios existe mayor capacidad de canal lo que demuestra que la comunicación o conectividad entre los nodos sensores es más fiable para este escenario lo cual verifica lo dicho anteriormente.

En la Figura 4.15 a continuación se tienen las gráficas de función de distribución acumulada para la relación de señal a ruido para cada potencia de ruido:

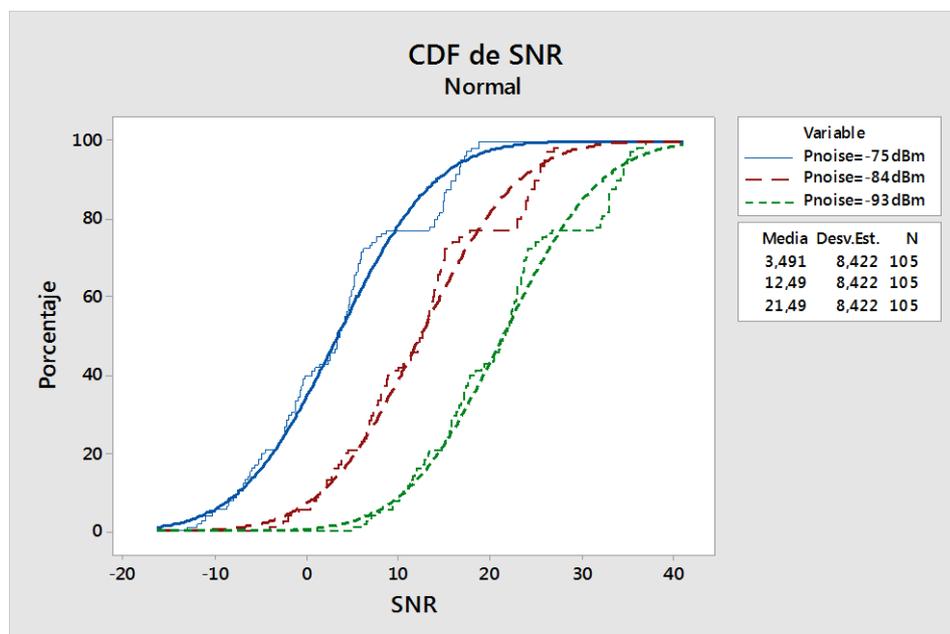


Figura 4.15: CDF para SNR

En la Figura 4.15 la gráfica color azul representa la relación señal a ruido para la potencia de ruido de -75dBm , la gráfica roja la relación señal a ruido para la potencia de ruido de -84dBm y la gráfica verde la relación de señal a ruido para la potencia de ruido de -93dBm . Se puede observar que para una potencia de ruido de -93dBm existe mayor relación señal a ruido, tiene una media de 21.48dBm , es decir las velocidades de transmisión son mayores así como su capacidad de canal.

Para la potencia de ruido de -84dBm se tiene una media de relación señal a ruido 12.49dBm , y una desviación estándar de 8.422 .

Para la potencia de ruido de -75dBm se tiene una media de relación señal a ruido de 3.491 dBm , y una desviación estándar de 8.422 .

Con estos datos se puede concluir que para una potencia de ruido de -93dBm que es el caso mínimo en nuestros tres escenarios existe un mayor SNR lo que demuestra que la comunicación o conectividad entre los nodos sensores es más efectiva y nos permite una comunicación a mayor distancia, verificando así los resultados obtenidos en la simulación.

Como se pudo analizar las gráficas de CDF para cada escenario y cada variable y también la simulación en la plataforma de Matlab se puede observar claramente que nuestro mejor escenario será para una potencia de ruido mínima.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede afirmar que para los tres escenarios analizados basados en la simulación con sus respectivas potencias de ruido -75dBm, -84dBm y -93dBm la comunicación entre los nodos sensores fue exitosa al no haber ningún nodo aislado es decir sin comunicación.

Se pudo obtener que para una potencia de ruido de -93dBm siendo ésta la mínima de nuestros tres escenarios las velocidades de transmisión fueron mayores oscilando entre 2000Kbps así también las capacidades de canal que se obtuvieron fueron altas con respecto a los otros dos escenarios y se obtuvo una relación de señal a ruido muy alta lo que nos indica que la comunicación es fiable, se realizó con éxito y tiene una cobertura o alcance mayor.

Para la potencia de ruido de -84dBm que es la potencia media de nuestros tres escenarios se obtuvo una velocidad de transmisión media de 1250Kbps lo que nos indica una relación señal a ruido con respecto a la velocidad de entre 6 y 9dBm, lo cual muestra una comunicación exitosa y fiable.

Para la potencia de ruido de -75dBm que es nuestro caso máximo se obtuvo una media de velocidad de transmisión de 554.8Kbps siendo ésta menor con respecto a los otros dos escenarios lo que nos indica que la comunicación tuvo éxito pero que se realiza de manera menos efectiva y fiable y que nuestros nodos no podrán comunicarse a distancias más grandes.

Al analizar las gráficas de distribución acumulada y las de simulación en la plataforma Matlab se puede concluir que para la potencia de ruido de -93dBm tenemos un escenario de conectividad más óptimo.

Analizar los parámetros a ser medidos en el escenario para el correcto diseño de la mota.

Realizar una topología adecuada para establecer la comunicación de los nodos de manera efectiva y en caso de no obtener comunicación de todos los nodos sensores, ubicar el sensor aislado en otro punto.

Establecer el modelo de propagación más adecuado según el escenario a ser analizado

En futuros estudios realizar la implementación de la red de sensores para obtener resultados más reales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Adjuntament de Barcelona. (2014, NOVIEMBRE 14). Barcelona Smart City (1ra ed.) [Online]. Disponible en: <http://smartcity.bcn.cat/en/bcn-smart-city.html>
- [2] D. M. Flórez, C. O. Sánchez, C. I. Páez., “Diseño e implementación de una red de sensores para la adquisición de variables relacionadas con la vigilancia estructural de puentes,” Ing. y Universidad J., vol. 13, pp. 411-421, Jul. 2009.
- [3] A. F. Rosado, “Herramientas de evaluación de riesgo para el diagnóstico de zonas urbanas contra desastres sísmicos,” IDNDR., Guayaquil, Oct. 25, 1999
- [4] Escuela P. Nacional. (2016). Sismología (1ra ed.) [Online]. Disponible en: <http://www.igepn.edu.ec/cayambe/825-proyecto-interinstitucional-para-monitoreo-de-terremotos-y-tsunamis>
- [5] Sistema Español de Información sobre el Agua (2007, Septiembre). Desastres colapsos de puentes (1ra ed.) [Online]. Disponible en: <http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/suplementos/Colapsos%20de%20puentes/desastres.htm#enlaces>
- [6]N. Battista, “Monitorización inalámbrica del movimiento longitudinal de la cubierta de un puente colgante,” Rev. Esp. De Elec., pp. 38-39, Junio, 2011.
- [7] Ambher. (2014). Monitoreo de la salud estructural (1ra ed.) [Online]. Disponible en: <http://www.ambher.com/monitoreo-de-la-salud-estructural>
- [8] Ing. Yi Ch. Liu, “Evaluación y monitoreo de salud estructural de puentes utilizando un sistema de instrumentación inalámbrico,” LanammeUCR. ,Ciudad Universitaria Rodrigo F. , Costa Rica , Rep. LM-PI-UP-02-2013, 2013.
- [9] Michael Batty, Kay Axhausen, Giannotti Fosca, Alexei Pozdnoukhov Armando Bazzani, Monica Wachowicz, Georgios Ouzounis, and Yuval Portugali, “Smart Cities of the Future,” European Union’s Seventh Framework Programme., Inglaterra, Londres, Rep. 214, 2012.

- [10] Fundación Telefónica, "Smart cities", (1ra ed.). Barcelona, España: Ariel S.A., 2011, pp. 13-15.
- [11] J. O. Da Paz, "Una red de sensores para las Smart cities," Tesis de Maestría, Fac. Inform., UCM, Madrid, España, 2015.
- [12] Libelium (2013,Abril 8). Libelium Smart world infographic (1ra ed.) [Online]. Disponible en: <http://www.libelium.com/libelium-smart-world-infographic-smart-cities-internet-of-things/>
- [13] R. Giffinger., H. Kramar., F. Strohmayer. (2013). Smart Cities (2da ed.) [Online]. Disponible en: <http://www.smart-cities.eu/?cid=2&ver=2>
- [14] Centro de Innovación del Sector Público de PWC e IE Business School, "Smart Cities La transformación Digital de las ciudades", 1ra ed. Barcelona, España: 2015, pp. 25-26.
- [15] AMETIC, Smart Cities, 1ra ed., Gijón, España: Graficas APEL, 2013.
- [16] L. Muñoz. (2010, Sep. 15). Smart Santander (1ra ed.) [Online]. Disponible en: <http://www.smartsantander.eu/>
- [17] IBM. (2010, Dic. 27). Gobierno de la Ciudad e IBM estrecha colaboración para hacer de Río de Janeiro una ciudad más inteligente. [Online]. Disponible en: <http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/33303.wss#release>
- [18] J. Iraceburu., J. Goicoechea., "Desarrollo e implementación de una red de inalámbrica de sensores de temperatura y humedad," Tesis de Ingeniería, Ing. Elect. y Telec. , Univ. Pública de Navarra, España, 2014.
- [19] E. Flores., "Redes de sensores aplicado a la medicina," Tesis de Maestría, TICRM, U. Cantabria, España, Santander, 2012.
- [20] M. J., "Simulation Analysis of tree and Mesh Topologies in Zigbee Network," R.I.C.D., vol. 8, no. 1, pp. 81-92, Feb., 2015.

[21] J. A. S., "Monitorización remota de las condiciones ambientales de un entorno delimitado," Tesis de Ingeniería, D.T.I.C., U. Alicante, Alicante, España, 2015.

[22] Zigbee. (2016). Zigbee (1ra ed.) [Online]. Disponible en: <http://www.zigbee.org/>

[23] Arcotel. (2016). Plan Nacional de Frecuencias [Online]. Disponible en: http://www.arcotel.gob.ec/wp-http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/plan_nacional_frecuencias_2012.pdf

[24] Y. Cheng., "Programa de infraestructura del transporte," Lanamme., Costa Rica, San José, Rep. LM-PI-UP-01-2013, 2013.

[25] R. Fernández, J. Ordieres, F. Martínez, A. González, F. Alba, R. Lostado, A. Pernía., "Redes inalámbricas de sensores Teoría y aplicación práctica", 26 ed. La Rioja, España: U. De La Rioja, 2009, pp. 39-40

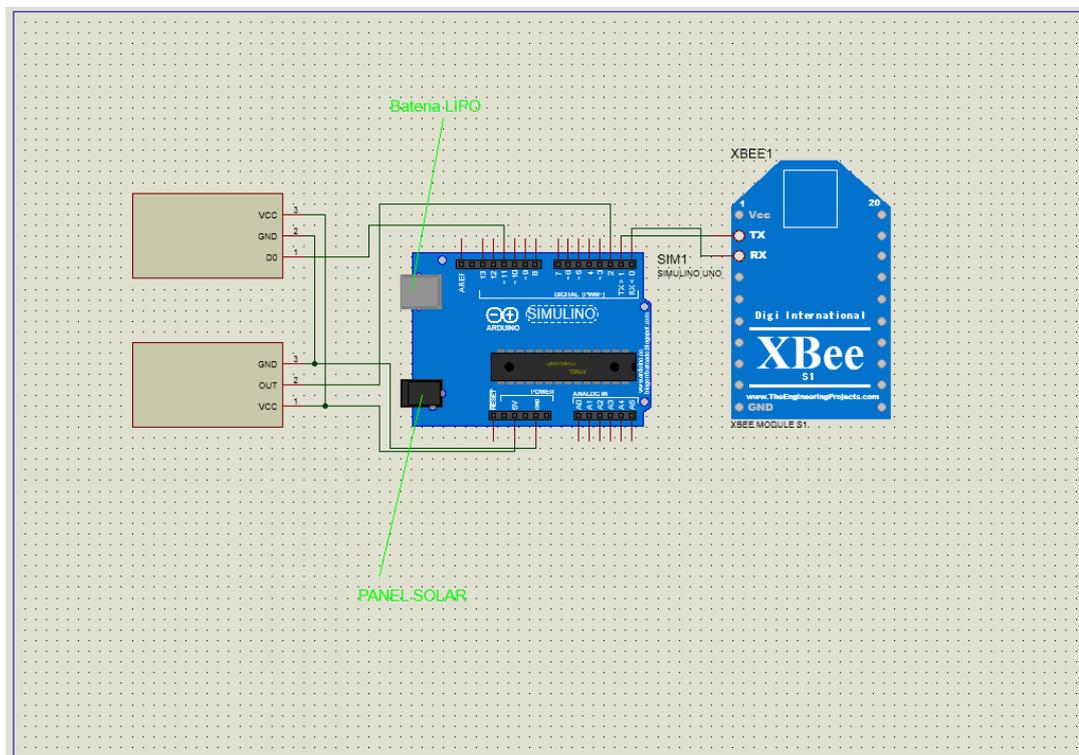
[26] Sputnik, "RF Propagation Basics," Sputnik, Moscú, Rusia, 2004.

[27] Erle Robotics. LiPo Batteries [Online]. Disponible en: <https://erlerobotics.gitbooks.io/erle-robotics-erle-copter/content/es/safety/lipo.html>

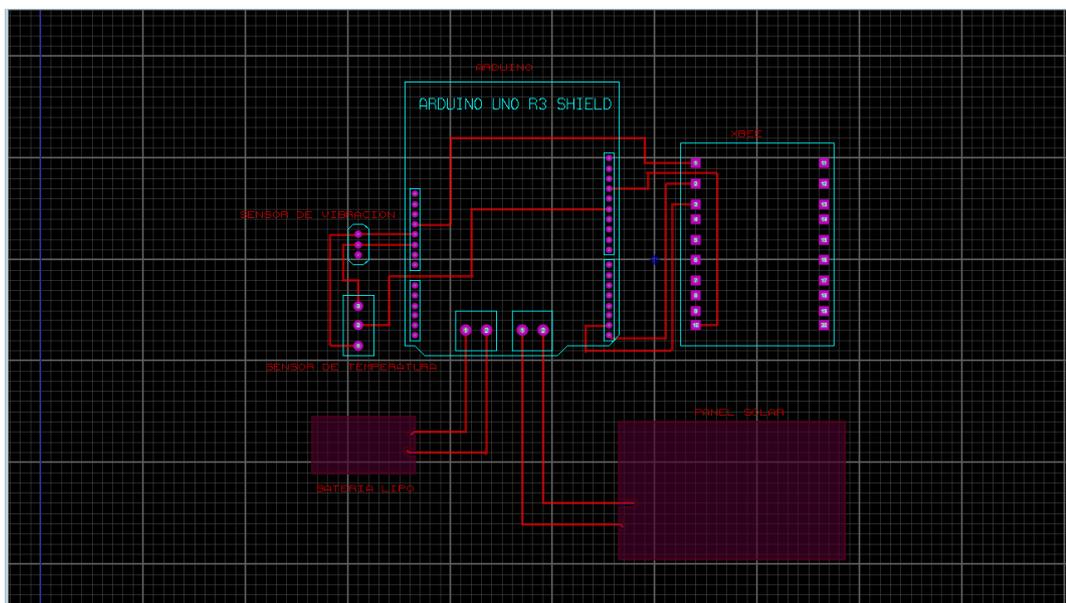
[28] CETRONIC. Arduino Solar Charger Shield V2.2 [Online]. Disponible en: <http://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idTienda=93&codProducto=151346002>

[29] Libelium (2013,Abril 8). Libelium Smart world infographic (1ra ed.) [Online]. Disponible en: <http://www.libelium.com/libelium-smart-world-infographic-smart-cities-internet-of-things/>

ANEXOS



Anexo 1: Diseño Esquemático de la Mota



Anexo 2: Diseño PCB de la Mota

Anexo 3: CÓDIGO DE LA SIMULACIÓN DE LA CONECTIVIDAD DE LOS NODOS SENSORES EN MATLAB

```
clear all,close all,clc
```

```
%% Determinar puntos %%
```

```
num_ap=15;
```

```
%% Matriz de puntos de ubicación de los sensores %%
```

```
P=[ 622443 9758339 4;%Nodo 1
```

```
622456 9758333 4;%Nodo 2
```

```
622472 9758327 5;%Nodo 3
```

```
622488 9758323 5;%Nodo 4
```

```
622502 9758318 6;%Nodo 5
```

```
622517 9758315 6;%Nodo 6
```

```
622509 9758285 6;%Nodo 7
```

```
622496 9758289 5;%Nodo 8
```

```
622481 9758293 5;%Nodo 9
```

```
622465 9758299 4;%Nodo 10
```

```
622452 9758303 4;%Nodo 11
```

```
622437 9758308 4;%Nodo 12
```

```
622460 9758316 4;%Nodo 13
```

```
622476 9758311 5;%Nodo 14
```

```
622490 9758306 5];%Nodo 15
```

```
P=P';
```

```

%% Matriz de posiciones %%

Pt=18; %[dBm]

Gt=5; %Ganancia de la antena transmisora

Gr=5; %Ganancia de la antena transmisora

f=2450e6; %[Hz]

Pnoise=-75; %[dBm] %Potencia de Ruido

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 %%

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 Propagación de Shadowing%%

gam=4;%Exponente de pérdida de propagación

L_absorption=10; %[dB]

L_0=(33*log10(1/8)+58.5); %Atenuación de espacio libre

L=(-10*gam.*log10(d)+L_0+L_absorption);%

%% 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

%% Capacidad de canal máxima %%
CC_2=(B/sp_f)*log2(1+10.^(S_N/10))/1e3;
```

Anexo 4: Validación del Código

Validación para tres puntos de ubicación de los nodos sensores:

Nodo 1: 622443	9758339	4
Nodo 2: 622456	9758333	4
Nodo 3: 622473	9758327	5

Potencia de Ruido Mínimo

SNR

$$S_N = P_r - P_{noise}$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L$$

$$P_r = 18 + 5 + 5 - (10 \cdot \text{gam.} \cdot \log_{10}(d) + L_0 + L_{\text{absorption}})$$

$$P_r = 18 + 5 + 5 - (10 \cdot 4 \cdot \log_{10}(d) + L_0 + 10)$$

$$P_r = 28 - (40 \cdot \log_{10}(d) + 28,6980304292659 + 10)$$

$$P_r = 28 - (40 \cdot \log_{10}(d) + 38,6980304292659)$$

$$Pr1_2 = 28 - (40 \cdot \log_{10}(14,3178210632764) + 38,6980304292659)$$

$$Pr1_2 = 28 - (46,23507722 + 38,6980304292659)$$

$$Pr1_2 = 28 - (84,93310765)$$

$$Pr1_2 = -56,9331076503810$$

$$Pr1_3 = 28 - (40 \cdot \log_{10}(31,4006369362152) + 38,6980304292659)$$

$$Pr1_3 = 28 - (59,8775383 + 38,6980304292659)$$

$$Pr1_3 = 28 - (98,57556873)$$

$$Pr1_3 = -70,5755687280901$$

$$Pr2_3 = 28 - (40 \cdot \log_{10}(17,1172427686237) + 38,6980304292659)$$

$$Pr2_3 = 28 - (49,33735241 + 38,6980304292659)$$

$$Pr2_3 = 28 - (88,03538284)$$

$$Pr2_3 = -60,0353828363481$$

$$S_N1_2 = -56,9331076503810 - (-93)$$

$$S_N1_3 = -70,5755687280901 - (-93)$$

$$S_N2_3 = -60,0353828363481 - (-93)$$

$$S_N1_2= 36,0668923496191$$

$$S_N1_3= 22,4244312719099$$

$$S_N2_3= 34,9646171636520$$

Velocidad de Transmisión

Como se observa el SNR mayor a 12 según se indica en la Tabla 7 la velocidad de transmisión será igual a 2000 Kbps

Capacidad de Canal

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}=(B/sp_f)*\log_2(1+10.^{(S_N/10)})/1e3;$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}=(3e6/8)*\log_2(1+10.^{(S_N/10)})/1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_1_2}=(3e6/8)*\log_2(1+10.^{(36,0668923496191/10)})/1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_1_3}=(3e6/8)*\log_2(1+10.^{(22,4244312719099/10)})/1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_2_3}=(3e6/8)*\log_2(1+10.^{(34,9646171636520/10)})/1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_1_2}= 4493,06966426081$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_1_3}= 2796,54996328452$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_2_3}= 4106,75159269532$$

Potencia de Ruido Medio

SNR

$$S_N=Pr-Pnoise$$

$$Pr= Pt+Gt+Gr-L$$

$$Pr= 18+5+5- (10^{*gam.*\log_{10}(d)+L_0+L_absorption})$$

$$Pr= 18+5+5- (10^{*4*\log_{10}(d)+L_0+10})$$

$$Pr= 28- (40*\log_{10}(d)+ 28,6980304292659+10)$$

$$Pr= 28- (40*\log_{10}(d)+ 38,6980304292659)$$

$$\text{Pr1_2}=28-(40*\log_{10}(14,3178210632764)+38,6980304292659)$$

$$\text{Pr1_2}=28-(46,23507722+38,6980304292659)$$

$$\text{Pr1_2}=28-(84,93310765)$$

$$\text{Pr1_2}=-56,9331076503810$$

$$\text{Pr1_3}=28-(40*\log_{10}(31,4006369362152)+38,6980304292659)$$

$$\text{Pr1_3}=28-(59,8775383+38,6980304292659)$$

$$\text{Pr1_3}=28-(98,57556873)$$

$$\text{Pr1_3}=-70,5755687280901$$

$$\text{Pr2_3}=28-(40*\log_{10}(17,1172427686237)+38,6980304292659)$$

$$\text{Pr2_3}=28-(49.33735241+38,6980304292659)$$

$$\text{Pr2_3}=28-(88,03538284)$$

$$\text{Pr2_3}=-60,0353828363481$$

$$\text{S_N1_2}=-56,9331076503810-(-84)$$

$$\text{S_N1_3}=-70,5755687280901-(-84)$$

$$\text{S_N2_3}=-60,0353828363481-(-84)$$

$$\text{S_N1_2}=27,0668923496191$$

$$\text{S_N1_3}=13,4244312719099$$

$$\text{S_N2_3}=23,9646171636520$$

Velocidad de Transmisión

Como se observa el SNR mayor a 12 según se indica en la tabla 7 la velocidad de transmisión será igual a 2000 Kbps

Capacidad de Canal

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}=(B/\text{sp}_f)*\log_2(1+10^{(S_N/10)})/1e3;$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}=(3e6/8)*\log_2(1+10^{(S_N/10)})/1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_1_2}=(3e6/8)*\log_2(1+10^{(27,0668923496191/10)})/1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_1_3}=(3e6/8)*\log_2(1+10^{(13,4244312719099/10)})/1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL_2_3}=(3e6/8)*\log_2(1+10^{(23,9646171636520/10)})/1e3$$

CAPACIDAD DE CANAL_1_2= 3372,84704643155

CAPACIDAD DE CANAL_1_3= 1696,36009664531

CAPACIDAD DE CANAL_2_3= 2987,49463922655

Potencia de Ruido Mínimo

SNR

$S_N = P_r - P_{noise}$

$P_r = P_t + G_t + G_r - L$

$P_r = 18 + 5 + 5 - (10^{\text{gam.}} \cdot \log_{10}(d) + L_0 + L_{\text{absorption}})$

$P_r = 18 + 5 + 5 - (10^4 \cdot \log_{10}(d) + L_0 + 10)$

$P_r = 28 - (40 \cdot \log_{10}(d) + 28,6980304292659 + 10)$

$P_r = 28 - (40 \cdot \log_{10}(d) + 38,6980304292659)$

$P_{r1_2} = 28 - (40 \cdot \log_{10}(14,3178210632764) + 38,6980304292659)$

$P_{r1_2} = 28 - (46,23507722 + 38,6980304292659)$

$P_{r1_2} = 28 - (84,93310765)$

$P_{r1_2} = -56,9331076503810$

$P_{r1_3} = 28 - (40 \cdot \log_{10}(31,4006369362152) + 38,6980304292659)$

$P_{r1_3} = 28 - (59,8775383 + 38,6980304292659)$

$P_{r1_3} = 28 - (98,57556873)$

$P_{r1_3} = -70,5755687280901$

$P_{r2_3} = 28 - (40 \cdot \log_{10}(17,1172427686237) + 38,6980304292659)$

$P_{r2_3} = 28 - (49.33735241 + 38,6980304292659)$

$P_{r2_3} = 28 - (88,03538284)$

$P_{r2_3} = -60,0353828363481$

$S_{N1_2} = -56,9331076503810 - (-75)$

$S_{N1_3} = -70,5755687280901 - (-75)$

$S_{N2_3} = -60,0353828363481 - (-75)$

$S_{N1_2} = 18,0668923496191$

$S_{N1_3} = 4,42443127190992$

$$S_{N2_3} = 14,9646171636520$$

Velocidad de Transmisión

Como se observa en la conexión entre el nodo 1 y 3 el SNR es 4 lo que nos indica según muestra la Tabla 7 y ya que su SNR es mayor igual a 3 y menor a 6 tiene una velocidad de transmisión de 250 Kbps, las conexiones entre 1 y 2, y entre 2 y 3 tienen velocidades de transmisión de 2000Kbps.

Capacidad de Canal

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL} = (B/sp_f) * \log_2(1 + 10^{(S_N/10)}) / 1e3;$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL} = (3e6/8) * \log_2(1 + 10^{(S_N/10)}) / 1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}_{1_2} = (3e6/8) * \log_2(1 + 10^{(27,0668923496191/10)}) / 1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}_{1_3} = (3e6/8) * \log_2(1 + 10^{(13,4244312719099/10)}) / 1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}_{2_3} = (3e6/8) * \log_2(1 + 10^{(23,9646171636520/10)}) / 1e3$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}_{1_2} = 3372,84704643155$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}_{1_3} = 1696,36009664531$$

$$\text{CAPACIDAD DE CANAL}_{2_3} = 2987,49463922655$$