



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“DISEÑO DEL DESPLIEGUE DE UNA RED DE
SENSORES PARA EL MONITOREO ESTRUCTURAL Y
DE SEGURIDAD DE UN EDIFICIO EN EL CENTRO DE
LA CIUDAD DE GUAYAQUIL”**

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

JORGE FRANCOIS FERNÁNDEZ RIVADENEIRA

JORGE LUIS RAMÍREZ GÓMEZ

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí, dándome fuerzas en los momentos más difíciles. A mis padres Janeth y Jorge por ser mi apoyo incondicional siempre, por respaldarme en mis decisiones y ayudarme a corregir mis errores. A mi mamá Martha por cuidar siempre de mí y ayudarme a ser mejor persona. A mis hermanos Rosemary y Julián por darme alegrías infinitas y motivarme a seguir adelante y jamás rendirme. A Damaris por apoyarme incondicionalmente dentro y fuera de la universidad. A la familia Ruano Lima por brindarme su ayuda en un momento muy difícil para mí, por su inmensa hospitalidad y generosidad. Por último, agradezco a mi compañero y amigo Jorge Luis por el arduo trabajo que hicimos para completar el presente proyecto.

Jorge Francois Fernández Rivadeneira

Agradezco sin lugar a dudas a Dios por permitirme llegar hasta este punto y a mis padres por encaminarme y darme ánimos para jamás rendirme en mi carrera universitaria, que aún con tropiezos, fue una grata experiencia que no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de ellos. Agradezco además a todos mis amigos, esas personas que a lo largo de mi carrera fueron formando parte de mi vida y continúan siendo un aporte fundamental en el proceso universitario, sin sus bromas, consejos y los momentos que compartimos este proceso no hubiera sido igual. Finalmente agradezco a mi compañero y amigo de trabajo Francois por el esfuerzo invertido y por jamás dejar de lado nuestra amistad aun cuando hubo etapas difíciles en el desarrollo de este proyecto.

Jorge Luis Ramírez Gómez

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi familia, especialmente a mis abuelos Zoila, Raúl y Fernando, quienes me cuidaron siempre y estuvieron para apoyarme en todo momento; sé que ahora desde el cielo siguen cuidándome y queriéndome tanto como yo a ellos.

Jorge Francois Fernández Rivadeneira

El presente proyecto se lo dedico de todo corazón a mi familia y amigos porque sin ellos a mi lado no hubiera sido posible lograr este objetivo, después de 6 años de universidad, sé que estoy aquí gracias a ellos y su apoyo incondicional.

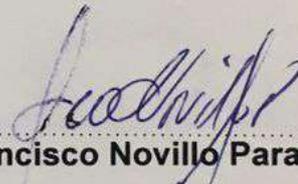
Jorge Luis Ramírez Gómez

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



Carlos Valdivieso Armendariz, MSc.

PROFESOR EVALUADOR



Francisco Novillo Parales, Ph.D.

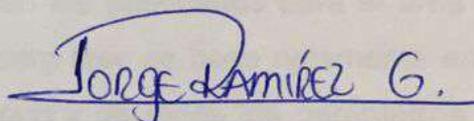
PROFESOR EVALUADOR

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"



Jorge Francois Fernández Rivadeneira



Jorge Luis Ramírez Gómez

RESUMEN

Para el presente estudio se propuso diseñar una red de sensores inalámbricos capaces de proveer un sistema de alerta temprana frente a desastres naturales, para ser específicos, los terremotos. Esta problemática se ha venido produciendo con frecuencia en muchos lugares del mundo es por eso que en base a las tecnologías de redes existentes y a los conceptos de Smart Cities se diseñará una Wireless Sensor Network (WSN) capaz de cubrir esa necesidad.

La primera fase corresponde al levantamiento de información estructural (estudio del escenario donde se trabajará) y de cómo se comportará dicha estructura frente a los posibles eventos naturales para los cuales se intenta estar preparado. La segunda fase comprende el análisis de que sensores serán los adecuados para el área en donde se desarrollará la red de sensores. La tercera fase se basa netamente en el estudio del dispositivo de comunicación inalámbrico y de todos los parámetros de configuración que se requieran para poder conformar la red inalámbrica que, junto con los sensores a colocar, se colocarán en el edificio para interconectarse entre sí y constituir la WSN. Como cuarta y última fase se realizará un análisis de propagación, en el cual, en función del modelo de propagación seleccionado, se simulará la red de sensores en base a los parámetros de configuración del dispositivo seleccionado y de las características del medio de trabajo.

Se adjuntan al final de este documento 3 anexos. El primero corresponde al glosario de términos. El segundo al código utilizado en Matlab para realizar las simulaciones de interés. El segundo anexo consta de 2 tablas que contienen los valores de capacidad de canal y SNR para 3 nodos específicos.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	II
DEDICATORIA.....	III
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA.....	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
CAPÍTULO 1.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Metodología.....	4
1.5 Limitaciones y Alcance	4
1.5.1 Limitaciones	4
1.5.2 Alcance	5
CAPÍTULO 2.....	6
2. ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1 Smart Cities.....	6
2.1.1 Definición	6
2.1.2 Smart Buildings.....	7
2.1.3 Casos de éxito de Smart Buildings	7
2.2 Tecnología WSN	8
2.2.1 Definición	8
2.2.2 Arquitectura de una WSN	10
2.2.3 Topologías	11

2.2.4	Elementos de un nodo WSN.....	13
2.3	Reglamentación para el uso de WSN.....	13
2.4	Características de Transmisión y Recepción	14
2.5	Sistemas existentes en base a tecnología WSN	15
CAPÍTULO 3.....		19
3.	METODOLOGÍA Y MODELAMIENTO.....	19
3.1	Escenario	19
3.2	Metodología.....	20
3.3	Fórmulas Matemáticas	22
3.4	Algoritmo	23
CAPÍTULO 4.....		25
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	25
4.1	Ubicación geográfica del sitio del diseño.....	25
4.2	Diseño de la mota.....	25
4.3	Parámetros de configuración.....	30
4.4	Análisis de resultados.....	31
4.4.1	Simulación en Matlab de los escenarios.....	31
4.4.2	CDF's para cada escenario	34
4.4.3	Gateway de la WSN	37
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		39
BIBLIOGRAFÍA.....		40
ANEXOS.....		43
Anexo 1: Glosario de términos		43
Anexo 2: Código empleado para realizar la simulación de los enlaces entre los diferentes nodos dispuestos para la red WSN.....		43
Anexo 3: Valores de capacidad de canal y SNR para los enlaces entre los nodos 4, 5 y 6, para el escenario con mayor ruido -77dBm.		47

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, los desastres naturales han ocurrido con mucha más frecuencia, dando a notar que dentro de los sistemas de seguridad hace falta una forma de monitoreo de las estructuras a lo largo del tiempo, puesto que, cuando ocurren movimientos telúricos de gran escala, dichas edificaciones van desgastándose si están mal construidas y pueden llegar a un colapso parcial o total. Este tipo de monitoreo es el principal problema que se pretende afrontar. [1]

Como es de conocimiento general, el 16 de abril del 2016 a las 18:58 ECT un terremoto con magnitud de 7.8 en la escala de Richter con epicentro entre los cantones de Pedernales y Cojimíes, azotó la costa ecuatoriana y causó grandes y cuantiosos destrozos en ciudades como Portoviejo, Manta, Bahía de Caráquez, Guayaquil, entre otras [2]. Este evento telúrico sin duda alguna dio a conocer las grandes deficiencias tanto en la calidad del suelo en donde se asientan las edificaciones, como la poca tecnología antisísmica desarrollada en el país, puesto que, la mayoría de edificios y residencias en las ciudades antes mencionadas fueron desaparecidas por la fuerza del terremoto y otras quedaron gravemente afectadas, algunas incluso tuvieron que ser evacuadas por temor a un posterior colapso.

Por otra parte, en la ciudad de Guayaquil, muchos de los grandes edificios fueron afectados por los estragos del flagelo de aquella noche, por lo que al ser edificaciones de más de 5 pisos, algunos fueron totalmente destrozados y otros quedaron comprometidos y aunque fueron evaluados por expertos en el tema, aún quedan dudas de si en realidad se podría superar otro suceso de este tipo sin que ocurran tragedias que lamentar. [3]

1.1 Descripción del problema

Debido a la problemática mencionada en el inciso anterior la seguridad de las edificaciones es una tendencia que ha venido creciendo con el avance de la tecnología y complejidad de las estructuras que se construyen actualmente.

No basta con simplemente tener cámaras de seguridad que muestren las personas que ingresan y salen de la edificación, pues se necesita ir más allá; poder llegar al punto de tener un monitoreo estructural del inmueble. La necesidad de un sistema con este alcance, es el de poder conocer el estado actual de la estructura de una edificación. Teniendo una red la cual permita conocer el estado de la edificación, permitirá actuar de la manera más apropiada y segura durante un siniestro. Entonces basado en esto, el gran problema que sale a la luz es la afectación que ocurre en las edificaciones durante un terremoto, la falta de un monitoreo constante que permita conocer el estado actual de la infraestructura y las consecuencias irreversibles que pudiere causar, tales como, pérdidas humanas, derrumbe parcial o total de la estructura, por ende, pérdidas económicas [4].

1.2 Justificación

Con la problemática ya explicada en el inciso anterior, se puede detallar que el proyecto a realizar es el diseño de una red de sensores, la cual va permitir poder monitorear la estructura de una edificación. Dicho monitoreo permitirá tener una idea del estado estructural de los inmuebles para en base a eso, ser evaluados y conocer si pueden soportar o no otro desastre natural.

En México, la Universidad Autónoma de Nuevo México (UNAM) ha implementado sistemas de redes de sensores para el monitoreo de algunos de sus edificios. El sistema que ellos aplicaron consta de 5 sensores, los cuales dan información de la intensidad del sismo y del estado de la estructura luego del mismo. Estos sensores trabajan basándose en referencias establecidas para la estructura y de los registros que tienen de eventos ocurridos anteriormente. De esta manera el sistema alerta y genera un reporte preliminar de la estructura. [5]

El monitoreo de una edificación es de vital importancia ya que permite conocer el estado del mismo en tiempo real. Contar con este sistema permitirá tomar

medidas de ayuda para evacuación y seguridad de las personas que se encuentren dentro de la edificación como: encender alertas, rutas de evacuación, llamadas de auxilio entre otras.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, la creciente ola de desastres naturales ha sacado a relucir la gran deficiencia de estructuras antisísmicas en el país, por lo que este estudio puede traer grandes beneficios a los edificios que lograron salir ilesos luego del terremoto del 16 de abril del 2016, ya que luego de dicho desastre se han empezado a desarrollar varias iniciativas por parte del gobierno para llevar un mejor control de las construcciones en el país [6], aun cuando se tienen las normativas necesarias para construcciones antisísmicas solo son revisadas en la parte del diseño mas no cuando se pasa al desarrollo de la obra.

En lugares como California, Estados Unidos, ya cuentan con sistemas de alerta temprana para sismos como CISN (California Integrated Seismic Network). Esta red está compuesta por sensores los mismos que al detectar las ondas provocadas por el sismo, emiten señales de alerta hacia una estación base, la misma que transmite el mensaje hacia las zonas que serán impactadas por dichas ondas, actualmente se pueden ganar hasta 10 segundos de ventaja. [7]

Japón por ser un país altamente sísmico, cuenta también con un sistema de alerta temprana contra los sismos. La JMA (Japan Meteorological Agency) ha desarrollado un sistema que al igual que el anterior detecta las ondas provocadas por el sismo, anuncia la alerta por medio de radio, tv y celulares permitiendo así tomar las medidas de seguridad correspondientes. [8]

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una red de sensores la cual servirá para monitorear a un edificio ubicado en el centro de la ciudad de Guayaquil.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar el diseño de una red de sensores inalámbricos, que tenga redundancia entre ellos.

- Desarrollar el diseño de una mota para un sistema contra incendios para un edificio, que cuente con los elementos adecuados para alertar a los usuarios.
- Desarrollar el diseño de una mota para un sistema de monitoreo estructural que permita conocer el estado actual de las edificaciones.
- Diseñar el Gateway que permitirá a la red de sensores conectarse con la nube, logrando acceder a la información remotamente.

1.4 Metodología

Se planea hacer uso de la tecnología de Internet of Things (IoT), específicamente el software y hardware libre disponible para la plataforma de Arduino, en la cual, se basarán la red de sensores implementados en un edificio del centro de la ciudad de Guayaquil. Se hará una visita a la edificación para conocer las necesidades que este tiene y poder encontrar los lugares propicios para la ubicación de los sensores. Una vez conocido el lugar, se va a diseñar el nodo (mota) donde se encontrarán los sensores de acuerdo a las necesidades que presenten los pisos, ya que no todos son iguales y tienen fines distintos. Luego de elaborar los nodos, se procede a crear la red para interconectarlos, de tal manera que se pueda acceder remotamente a cada uno de ellos. Por último, se va a configurar el Gateway para tener acceso a la nube. Una vez hecho esto se realizarán las simulaciones respectivas y análisis de estos resultados.

1.5 Limitaciones y Alcance

1.5.1 Limitaciones

- Al trabajar con un software libre, existen algunos problemas de compatibilidad con ciertos sensores que no sean de esta familia.
- El presente trabajo no cuenta con simulaciones de transmisión de datos.

1.5.2 Alcance

- Se podría crear una red de edificios que se conectan con el municipio de la ciudad, con lo cual en caso de existir algún desperfecto luego de un sismo, estos reporten su estado.
- Podría implementarse este mismo sistema, pero en menor escala para casas por ejemplo en urbanizaciones, y la red de la urbanización podría activar alarmas generales en toda el área de la urbanización para alertar a sus habitantes.
- Al utilizar sistemas más robustos, el monitoreo de la red de sensores puede ser mucho más precisa y dar un grado de confiabilidad que cumpla con las expectativas que las personas encargadas desearían.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE.

En base a los objetivos descritos en el capítulo anterior, en la presente sección se describirán más a fondo las características de los elementos que comprende una WSN; desde la mota, pasando por la topología y arquitectura de la red, hasta llegar al diseño del Gateway para la red. Por último, se mencionarán las aplicaciones que en la actualidad representa su implementación.

Es importante mencionar que esta creciente ola de redes inalámbricas tiene un gran impacto en lo que se denomina Smart Cities, puesto que, se fundamenta en las redes WSN para permitir y proyectar un funcionamiento eficiente en los aspectos que comprende.

2.1 Smart Cities

2.1.1 Definición

El concepto de Smart Cities está basado en un nuevo arquetipo de planificación y gestión de una urbe, puesto que, se basa en el masivo uso de las TIC (Tecnologías de la información y la comunicación), para poder mejorar las ciudades en el aspecto social, económico y ambiental, haciendo uso de la tecnología disponible hasta el momento. El concepto de Smart City fundamenta el uso de las nuevas tecnologías, ya que, entre muchos beneficios, lo que destaca es el marco evolutivo de este concepto hacia un desarrollo urbano sostenible. [9]

Las Smart Cities se confinan en muchos ámbitos sobre los cuales se construyen las bases de la misma, entre ellos se pueden mencionar, medio ambiente (agua y residuos), energía, movilidad, edificios y viviendas, entre otros. Es importante tener en cuenta que para el correcto desarrollo de una ciudad inteligente, parte importante es la eficiencia con la que desempeñan los ciudadanos dentro del entorno inteligente que se les presenta. [10]

2.1.2 Smart Buildings

Como se mencionó en el capítulo anterior, se trabajará en un edificio de la ciudad de Guayaquil, por ende, es importante conocer lo que implica tener un Smart Building dentro de una Smart City.

Un Smart Building se basa en la premisa de permitir integrar servicios que hasta hace algunos años parecían mundos diferentes, es así como dentro de esta nueva tecnología se conectan sistemas de bajo costo ambiental, uso eficiente de la red eléctrica, confort, seguridad, calefacción, ventilación y sistemas de aire acondicionado. Integrar todos estos sistemas en una robusta red de tecnologías funcionales e independientes es el objetivo principal de un Smart Building, partiendo desde el nivel más básico el cual es el de proveer servicios que hagan a los ocupantes del establecimiento productivos (iluminación, salubridad, etc.), hasta el nivel más alto que implica “pensar inteligente” desde la fase de diseño hasta el final de la vida útil del edificio. [11]

2.1.3 Casos de éxito de Smart Buildings

A continuación, se mencionarán algunos casos donde se ha implementado la tecnología de Smart Building alrededor del mundo y cuáles fueron las innovaciones dentro y fuera de la edificación.

El edificio de Rotterdam, que, con sus tres torres, es una estructura que ha transformado el Skyline de la ciudad portuaria holandesa, puesto que, a más de ser una bella obra arquitectónica, cuenta con diferentes tecnologías que lo convierten en un versátil edificio inteligente. Dotado de un sistema energético con calificación A para las oficinas, ha logrado producir una gran cantidad de energía gracias a que cuenta con paneles solares ubicados en el tejado de las torres, a esto se suman las turbinas eólicas y el sistema de refrigeración y calefacción que funciona gracias al agua del río Maas. Todo en conjunto representa una auténtica obra de ingeniería energética, aprovechando al máximo los recursos que le proveen y disminuyendo así, el impacto ambiental. [12]

Por otra parte, el edificio Capital Tower en Singapur, es un claro ejemplo de las diversas áreas a las que se enfoca un edificio inteligente, puesto que, aparte de contar con su sistema de eficiencia energética, tiene un sistema de reciclaje para reducir el impacto ambiental, también posee un sistema inteligente de parqueo, ya que, en una pantalla en la pared se indica en tiempo real la disponibilidad de lugares, buscando así reducir el tiempo que toma parquearse, así como también combustible. Además, cuenta con un sensor de Monóxido de carbono en el área de parqueo que hace que se enciendan los ventiladores, una vez superadas las 1000 partes por millón. [13]

2.2 Tecnología WSN

2.2.1 Definición

Una WSN (Wireless Sensor Network) o red de sensores inalámbricos, los mismos que se encuentran distribuidos en diferentes posiciones para monitorear parámetros como: condiciones ambientales, estructuras de edificaciones, aplicaciones industriales, aviónica, entornos inteligentes, identificación de productos, domótica, seguridad, entre otros. Todos estos sensores además de encontrarse conectados entre ellos tienen un Gateway el cual les permite acceder a la nube. [14]

Las WSNs pertenecen a una nueva tecnología que ha sido reconocida por medios especializados en el tema, como una prometedora forma de comunicación a bajo coste en las áreas de aplicación ya mencionadas. Su principal forma de innovación se basa en la capacidad de poder sustituir sensores de alta complejidad por una cantidad de sensores más sencillos, pero igual de eficientes. Es así como a través de una WSN se pueden desplegar sensores en lugares de difícil acceso o a su vez dentro de zonas de desastre, ya que, los nodos poseen enlaces radio de baja potencia para una cobertura relativamente pequeña, consiguiendo de esta forma economizar el consumo de potencia y al contar con diferentes formas de darle redundancia a la red de nodos tales como OFDM, FHSS o DHSS

permitiendo así una gran capacidad de respuesta a fallos y por lo tanto un balance al consumo de energía. [15]

Entonces habiendo explicado las características de una WSN, a continuación, se muestra un esquema básico de cómo es implementada esta red y cuáles son sus elementos principales.

En la figura 2.1. Se bosqueja el esquema de una WSN y como sus elementos se interconectan entre ellos (nodos), así como también hacia el internet, en donde, la información puede ser vista desde un dispositivo móvil o un ordenador.

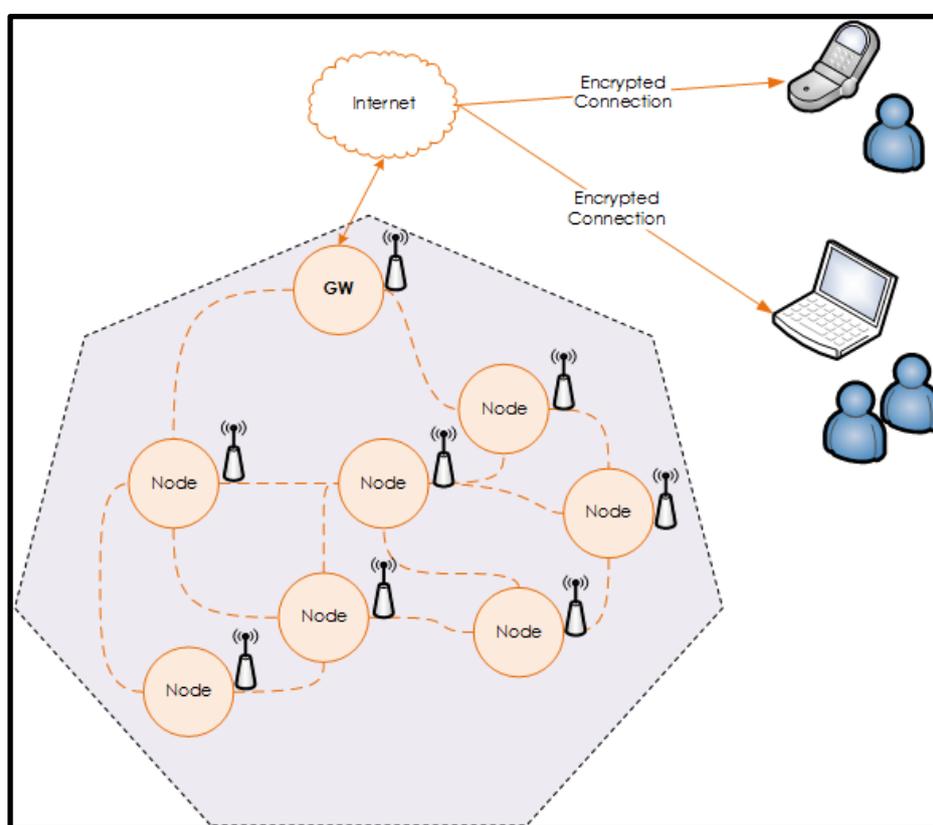


Figura 2.1 Esquema básico de una WSN

2.2.2 Arquitectura de una WSN

Para la arquitectura de una WSN tenemos que los nodos se encuentran dispersos en el escenario que se desea analizar. Podemos señalar 3 partes de la arquitectura bien definidas: Sensores, Gateway y Usuario final. A continuación, se aprecia la arquitectura en la figura 2.2. [16]

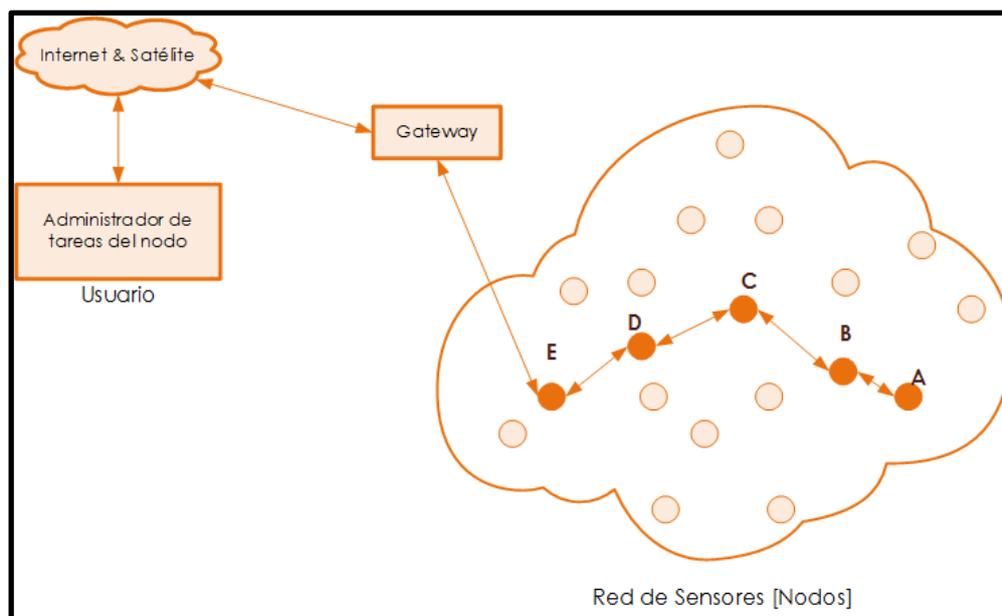


Figura 2.2 Arquitectura de una red de sensores inalámbricos

Sensores: son los encargados de obtener la información deseada del escenario, es decir son los que van a interactuar con el medio a estudiar. Para nuestro caso es la estructura de un edificio y parámetros como humo y temperatura. Cada uno de estos sensores se puede encontrar conectados entre sí, directamente con el Gateway o ambas, según la topología de la red que se esté utilizando. Los sensores pueden ser tanto generadores de información como pueden dar paso a la generada por los sensores aledaños. Estos distribuyen su energía para realizar ambas actividades, pero siempre será la de censar la de mayor prioridad; de manera que, si la energía empieza a escasear en la fuente, el sensor automáticamente empezará a dejar de dar paso a la información que no es suya y simplemente quedará censando la suya y enviándola. [17]

Gateway: es quien permite la comunicación entre los sensores y la nube, es decir la conexión a internet. Esta parte es de gran importancia ya que es quien permitirá que la red envíe su información para poder ser analizada por el usuario final. El Gateway puede ser mediante radio enlace o fibra óptica, dependiendo de cuál es el mejor según el medio en que se está trabajando. [18]

Usuario final: es la persona que se encuentra encargada del análisis de los datos obtenidos por la red, además de ser el encargado de revisar el estado de toda la red. El usuario final va a acceder a la información mediante internet, como ya mencionamos todo esto gracias al Gateway. [19]

2.2.3 Topologías

Para una WSN existen 2 tipos de topología [20] típicamente utilizadas que son:

- **Centralizada:** en esta topología todos los nodos se encuentran conectados con un nodo central, se trata del Gateway. En esta topología el Gateway al tener que estar conectado con todos los demás nodos, se encuentra siempre ubicado de tal manera de que todos puedan alcanzarlo utilizando la cantidad óptima de potencia. Una de las ventajas que presenta este tipo de topología es que cada nodo al estar directamente conectado con el Gateway puede enviar su información de manera más segura, es decir no hay puntos intermedios donde la información pueda dañarse o perderse. Por otra parte, una desventaja de este tipo de topología es que, al tener un único camino hacia un nodo, si este llega a caer, el nodo pierde total comunicación con el Gateway, por ende, su información jamás alcanza al usuario final como se espera. Un ejemplo de este tipo lo observamos en la figura 2.3, donde tenemos la topología estrella.
- **Punto a Punto:** en este tipo de topología no todos los nodos se encuentran conectados directamente con el Gateway, pero todos

son capaces de llegar a él; lo hacen pasando por los nodos más cercanos, es decir estos les sirven de puente para alcanzar al Gateway. Una gran ventaja que presenta este tipo de topología es que un nodo tiene más de un camino para poder alcanzar el Gateway, es decir los nodos no perderán la comunicación con el resto de la red, aunque uno de sus enlaces falle. Una desventaja que presentan estos sistemas es que demandan mayor energía al nodo, ya que ahora este no solo deberá de cumplir su función de sensar y enviar su información, sino que también deberá de enrutar la información que los nodos aledaños le envíen para mandar al Gateway. En la figura 2.3 se puede apreciar 2 variantes de este tipo de topología. En la primera que es tipo Estrella, los nodos se conectan directamente al Gateway. En la segunda que es tipo Árbol, los nodos se encuentran en niveles jerárquicos, siendo el Gateway el principal de todos. Y la tercera que es tipo Malla, presenta una mayor interconexión entre sus nodos, en la que sólo los nodos más lejanos no presentan más de un enlace, mientras que los del centro tienen 2 o más.

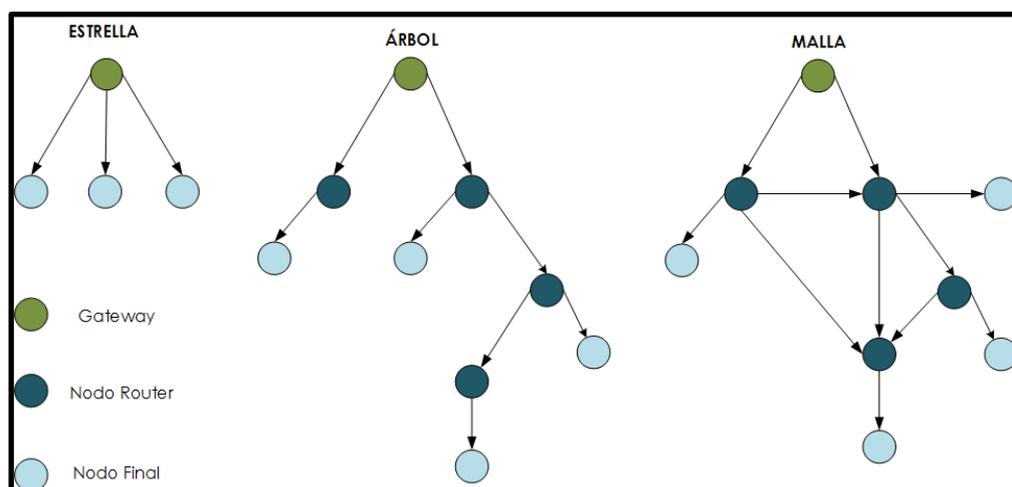


Figura 2.3 Topologías comunes para WSN

2.2.4 Elementos de un nodo WSN

Un nodo debe de tener varios elementos que permitan obtener la información propicia del entorno a estudiar [21], poder procesar dicha información, tomar acciones de acuerdo a lo censado y a su vez informar al usuario lo que está ocurriendo. Además, se debe de poder administrar remotamente y debe de dar información acerca de si mismo, de tal manera se pueden hacer revisiones preventivas con el fin de cuidar la integridad del equipo. Para cumplir con todos estos requerimientos un nodo debe constar los siguientes elementos:

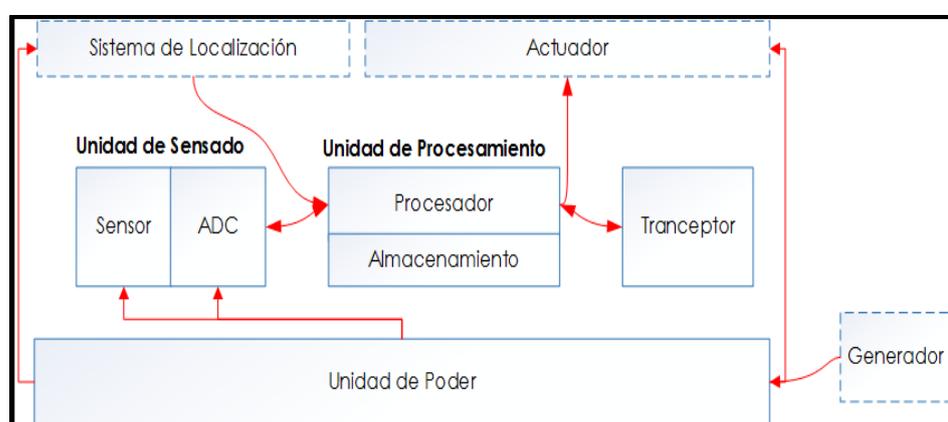


Figura 2.4 Elementos de un nodo para WSN

Los elementos de un nodo se encuentran conectados como se aprecia en la figura 2.4. Algunos de ellos pueden no estar presentes en todos los nodos, por ejemplo, el generador; en ocasiones no se necesita del mismo ya que el nodo tiene poca demanda de energía, por lo que se omite un generador. En algunos nodos también se puede hacer omisión del actuador ya que estos solo toman datos y no requieren de un actuador o indicador.

2.3 Reglamentación para el uso de WSN

De acuerdo al plan nacional de frecuencias expedido en el año 2012 por la CONATEL (Consejo Nacional de Telecomunicaciones) y SENATEL (Secretaría Nacional de Telecomunicaciones), la banda 2400 MHz se encuentra sujeta a la nota EQA.90 la cual señala lo siguiente:

“En las bandas 902 - 928 MHz, 2400 - 2483,5 MHz, 5150 - 5350 MHz, 5470 - 5725 MHz y 5725 - 5850 MHz, también operan sistemas de Modulación Digital de Banda ancha y enlaces auxiliares de radiodifusión sonora que utilizan técnicas de modulación digital de banda ancha sin protección contra interferencias perjudiciales.” [22]

Por lo antes mencionado se puede notar que no existen restricciones para el uso de dicha banda para el propósito de este proyecto. Además, se debe tener en cuenta que dicha banda puede llegar a saturarse por lo que se debe tener cuidado a la hora de implementar el sistema.

2.4 Características de Transmisión y Recepción

Para el diseño de la mota, de la WSN que se desea diseñar, se ha tomado en consideración luego de un estudio previo, la utilización de un módulo WiFi, que cumple con las características que se han planteado para la red a implementar. El módulo WiFi ESP8266 es un SOC embebido con la pila de protocolo TCP/IP integrada, que puede dar acceso a cualquier microcontrolador a la red WiFi. Cuenta con varias características que encajan con lo requerido para llevar a cabo una WSN, en la tabla 1 se muestran algunas características del mismo:

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Voltaje de alimentación	3~3.6	V
Temperatura de operación	-40°~125°	°C
Frecuencia de operación	2.4	GHz
Corriente de operación	80	mA
Rango de frecuencia	2400~2483.5	MHz
Protocolos WiFi	802.11 b/g/n	
Potencia de Transmisión	802.11 b	+20 dBm
Potencia de Transmisión	802.11 g	+17 dBm
Potencia de Transmisión	802.11 n	+14 dBm
Sensibilidad de recepción (11 Mbps)	802.11 b	-91 dBm
Sensibilidad de recepción (54 Mbps)	802.11 g	-75 dBm
Sensibilidad de recepción (MCS7)	802.11 n	-72 dBm
Tipo de antena	PCB, Externa, Conector IPEX, Chip cerámico	
Modos de WiFi	station/softAP/SoftAP+station	

Seguridad	WPA/WPA2
Encriptación	WEP/TKIP/AES
Certificados	FCC/CE/TELEC/SRRC
Protocolos de red	IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP

Tabla 1: Características técnicas ESP8266. [23]

2.5 Sistemas existentes en base a tecnología WSN

Actualmente, alrededor del mundo se han implementado diferentes tecnologías capaces de alertar de manera temprana con unos cuantos segundos la posible ocurrencia de desastres naturales, entre ellos, huracanes y terremotos, ya que, estos son los que mayormente afectan las edificaciones en las diferentes ciudades del planeta.

Existen sensores como el Secty Lifepatron Master, el cual genera una alerta debido al sismo, mediante el encendido de 2 sirenas. El detector se lo puede apreciar en la figura 2.5 [24]. Además, cuenta con una válvula electromagnética, la misma que sirve para el control del paso de gas. La instalación del sensor se hace a través de una pantalla LCD que se encuentra en el equipo.



Figura 2.5 Detector Sísmico Master

Existen redes de sensores especializadas para el monitoreo de la energía en un edificio, como en la Universidad Politécnica de Cataluña, específicamente el edificio B4 del Parque Mediterráneo de la Tecnología, en la figura 2.6 [25] se muestra el despliegue de los sensores en la planta baja de dicho edificio. En este se analiza específicamente el consumo de los acondicionadores de aire (splits); para ello se realizaron pruebas y simulaciones con diferentes programas y sensores buscando el más óptimo para el escenario.

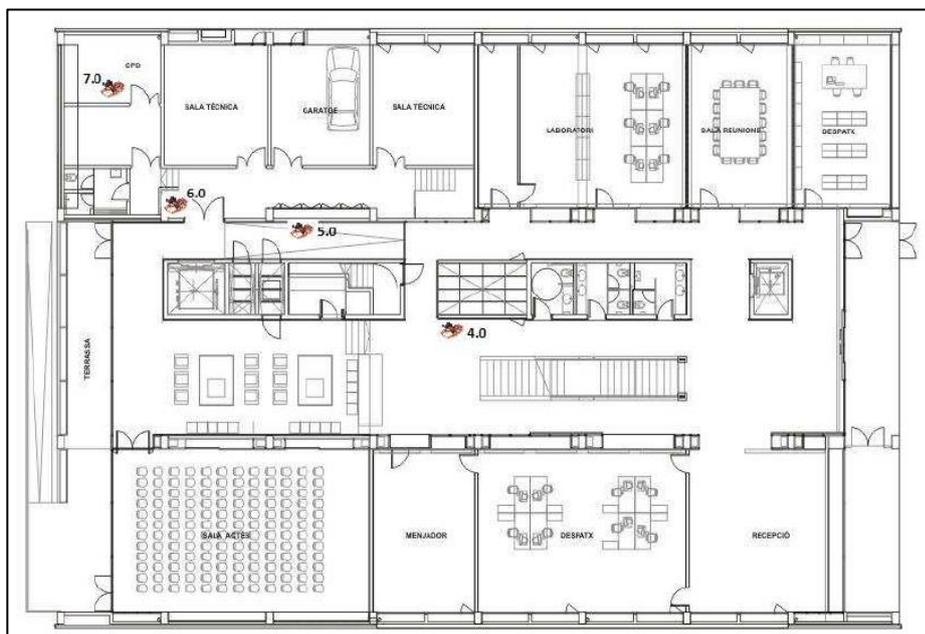


Figura 2.6 Despliegue de sensores edificio B4

Por otra parte, la empresa Amber TM, cuenta con su sistema llamado “Monitoreo de Edificios CX1”. Este sistema cuenta con una amplia gama de sensores de alta precisión y de un costo moderado. Dichos sensores son capaces de detectar varios parámetros que se detallan en la figura 2.7 [26]. El despliegue de todo este sistema cuenta con varias ventajas como: poder trabajar a la intemperie, son sensores ópticos a prueba de corrientes electromagnéticas, además es capaz de recopilar toda la información obtenida de los sensores y realizar análisis de estos datos.

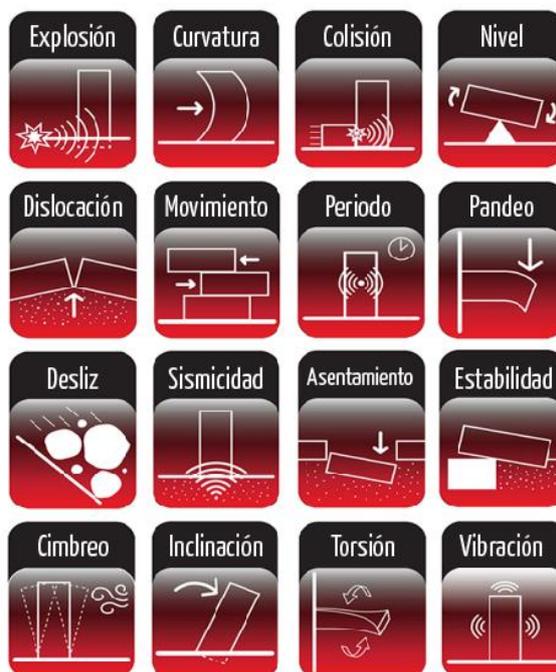


Figura 2.7 Parámetros que monitorea CX1

Otro claro ejemplo es el desarrollado en Japón por la agencia meteorológica de Japón (JMA), conocido como EEW (Early Earthquake Warning) por sus siglas en inglés, es un sistema de alerta a terremotos, que avisa después que se detecta un terremoto, puesto que, despliega una red de sensores capaces de dar mensajes de peligro además de una guía de cómo reaccionar ante dichas advertencias. En la figura 2.8 [27] se puede apreciar un diagrama esquemático de cómo funciona el sistema. El sistema cuenta con dos esquemas uno es para el Servicio Meteorológico e Hidrológico y el otro para el público en general. La red de sensores sísmicos está desplegada en varios puntos de ciudad, incluyendo la zona costera, estos sismómetros, detectan las ondas P (ondas longitudinales primarias del suelo) y esta información es analizada por la JMA, cuando son ondas muy fuertes, se inicia el sistema de alerta para distribuir la advertencia a los usuarios tales como, estaciones de radio, teléfonos móviles, empresas antes de la llegada de las ondas S (ondas preliminares a un terremoto), ya que, pueden existir movimientos sísmicos de menor escala y por seguridad no se hace pública esta información (cuando se espera una escala *shindo* 5 o superior). Con la red

de sensores desplegada en toda la ciudad, se busca ayudar a las personas a reducir en lo más mínimo los daños causados por un terremoto, permitiéndoles refugiarse o alejarse de zonas peligrosas.

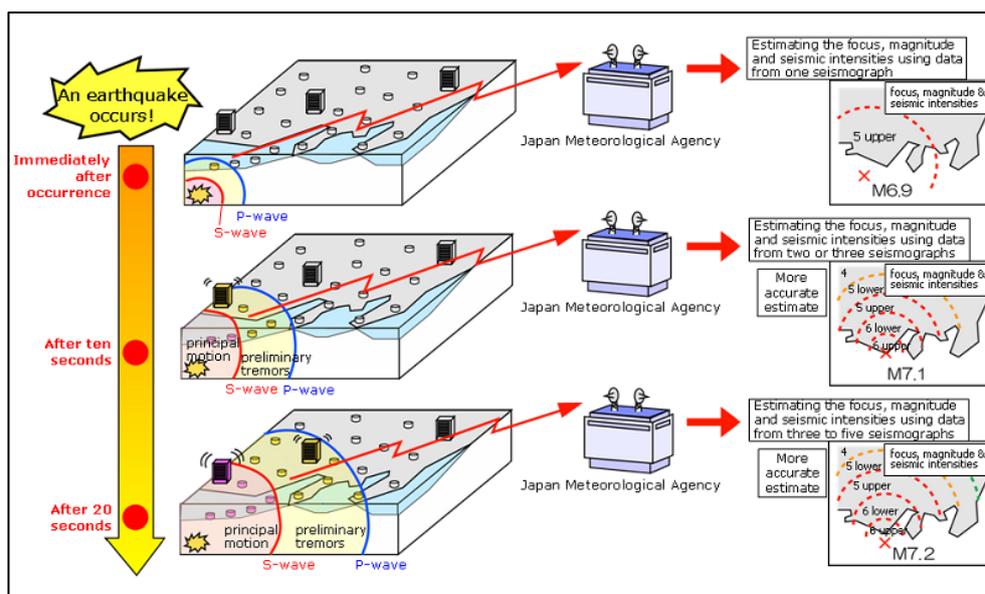


Figura 2.8 Esquemático del EEW

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA Y MODELAMIENTO

En el capítulo anterior se detallaron los conceptos relacionados con las tecnologías desarrolladas para WSN, puesto que, en base a esto se pondrá en marcha el proceso para poder realizar el diseño de la WSN en un edificio del centro de la ciudad de Guayaquil. Si bien es cierto hasta ahora sólo se han descrito modelos y sistemas implementados, así como también características de los dispositivos que permiten la comunicación inalámbrica, en este capítulo se detallarán los pasos a seguir para poder diseñar la red, en lo que corresponde a, descripción del escenario, metodología, ecuaciones matemáticas y el algoritmo a desarrollar.

3.1 Escenario

Como se explicó en secciones anteriores, el diseño de la red de sensores inalámbricos será realizado para poder ser desplegado en un edificio de más de 20 pisos, como se aprecia en la figura 3.1 [28]. El escenario de comunicación entre los nodos de la red de sensores será de varios ambientes, es decir, oficinas, departamentos y parqueos, teniendo así diferentes paredes y pisos por los cuales el enlace entre los nodos deberá pasar. Posteriormente se describirá la metodología a utilizar y los modelos o requisitos con los cuales deberá contar la red para poder trabajar eficientemente.



Figura 3.1 Centro de Guayaquil

3.2 Metodología

Para poder realizar el diseñar la WSN, se ha elaborado un proceso secuencial dividido en etapas como se muestra en la figura 3.2.

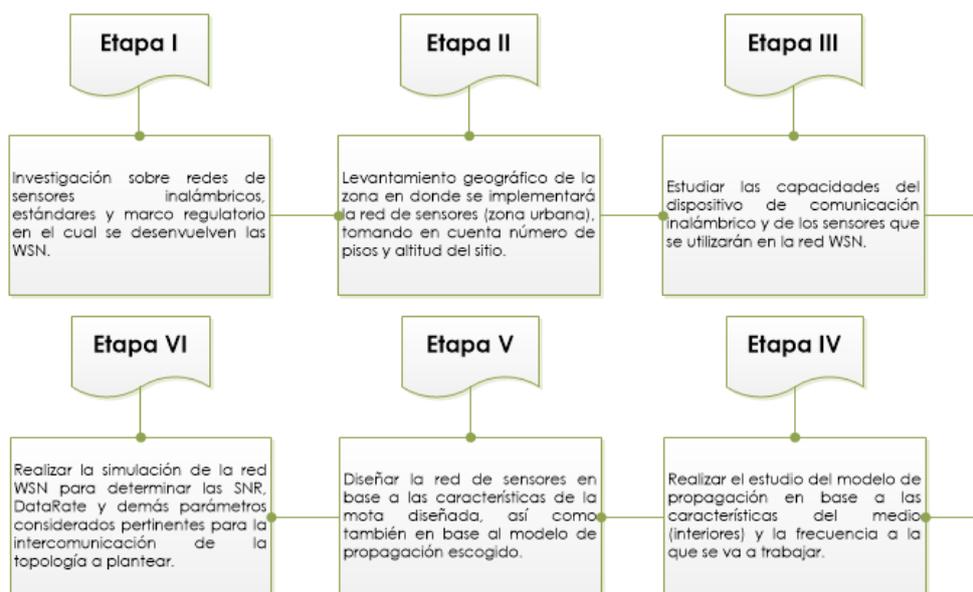


Figura 3.2 Esquema de la metodología a implementar.

La metodología de trabajo se ha dividido en etapas con la finalidad de mostrar secuencialmente el proceso que se siguió para lograr el correcto diseño de la red de sensores inalámbricas. A continuación, se detalla cada una de las etapas mostradas en la figura 3.2:

Etapa I

Como primera etapa se tiene realizar la investigación respectiva para poder comprender todos los conceptos que comprenden una red de sensores inalámbricos, así como también, las leyes y los estándares que se emplean para el despliegue de este tipo de red de sensores. También se investigarán varias de las tecnologías desplegadas en lo que respecta a redes de sensores inalámbricos para cubrir las necesidades antisísmicas que se desarrollan actualmente.

Etapa II

En la segunda etapa se realizará el estudio geográfico del lugar en donde se realizará el diseño de la red WSN, para ser específicos, un edificio del centro de la ciudad de Guayaquil, el cual cuenta con más de 20 pisos. Se deberá tener en cuenta el diseño arquitectónico para la ubicación de los sensores, así como la altura y área de la estructura que se está estudiando.

Etapa III

En esta etapa se estudiarán todos los parámetros de hardware y software de los dispositivos escogidos para realizar la mota. Es importante mencionar que en esta etapa se estudiarán las características de transmisión y recepción del módulo inalámbrico, tomando en cuenta la tasa de datos a la que puede trabajar.

Etapa IV

En este punto se estudiará a fondo la propagación de la señal entre los nodos, por ende, se buscará el modelo de propagación adecuado, tanto en frecuencia como en escenario, con el fin de garantizar la confiabilidad de la red WSN a diseñar.

Etapa V

En esta sección se realizará el diseño de la red de sensores, es decir, las motas y el despliegue de la topología de la red, para que cumpla con los parámetros previamente establecidos en base al modelo de propagación seleccionado en la etapa anterior.

Etapa VI

Finalmente, como sección final se realizará la simulación de la red mediante software, con esto, se determinarán valores de SNR, los cuales a su vez darán un estimado de a qué tasa se trabaja y si los mismo cumplen los estándares pre establecidos, ya que, caso contrario se reubicarán las motas hasta que dichos parámetros guarden concordancia.

3.3 Fórmulas Matemáticas

En el presente proyecto, es de interés calcular valores de potencia y capacidad de canal en los enlaces que conectarán a las motas. Para ello se utilizarán las siguientes expresiones matemáticas:

La expresión 3.1 permite encontrar el valor de la potencia recibida en los nodos, como se puede apreciar, ésta se ve afectada no solo por las características de los equipos, sino también, por el medio en el cual se desarrollará el proyecto.

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

Donde:

Pr: Potencia recibida [dB]

Pt: Potencia transmitida [dB]

Gt: Ganancia del transmisor [dB]

Gr: Ganancia del receptor [dB]

L: Pérdidas de propagación [dB]

La expresión 3.2 corresponde al modelo COST 231 Keenan y Motley. Este modelo fue desarrollado exclusivamente para interiores y considera la pérdida ocasionada por paredes y pisos con características similares. [29]

$$L = L_0 + 10\gamma \log d + \sum_{i=1}^I N_{f,i} L_{f,i} + \sum_{j=1}^J N_{w,j} L_{w,j} \quad (3.2)$$

Donde:

L_0 : Pérdidas de propagación a un (1) metro de la antena transmisora, en dB

γ : Exponente de pérdida de propagación

d: distancia entre transmisor y receptor

$N_{f,i}$: Número de pisos con las mismas características

$L_{f,i}$: Pérdidas de propagación de la señal a través de los pisos, en dB

$N_{w,j}$: Número de paredes con las mismas características

$L_{w,j}$: Pérdidas de propagación de la señal a través de paredes, en dB

I: Número de tipos de pisos atravesados por la señal

J: Número de tipos de paredes atravesados por la señal

En la tabla 2 se presentan los valores típicos de las pérdidas detalladas anteriormente:

TIPO DE PÉRDIDA	RANGO DE ATENUACIÓN (dB)
L_f	13 - 27
L_{w1}	2 - 4
L_{w2}	8 - 12

Tabla 2: Atenuaciones debido a paredes y pisos

La expresión 3.3 es el teorema de Shannon, el mismo que nos permitirá obtener la máxima capacidad del canal. [30]

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (3.3)$$

B: ancho de banda

S/N: relación señal a ruido adimensional

3.4 Algoritmo

Para el desarrollo del proyecto primero se determinan los puntos en los que van a estar ubicadas las motas. Luego de ello se terminará la distancia de cada mota respecto a las demás. Ahora se definirá la potencia de transmisión y ganancias de antenas receptoras y transmisoras. Con todos estos datos se procede a calcular la potencia recibida en el receptor. Luego de ello se calculará la SNR, si al menos un canal cumple con los requerimientos entonces la mota está correctamente posicionada, caso contrario se debe de reubicar la mota y volver a calcular. Se realizará 3 veces dicho procedimiento, para 3 escenarios:

- Baja congestión.
- Mediana congestión.
- Alta congestión.

En la figura 3.3 se explica el algoritmo a utilizar para poder desarrollar la WSN en base a los objetivos planteados. Es importante mencionar el hecho de que este orden secuencial debe seguirse siempre que se vaya a configurar una WSN nueva dentro de cualquier ambiente estructural.

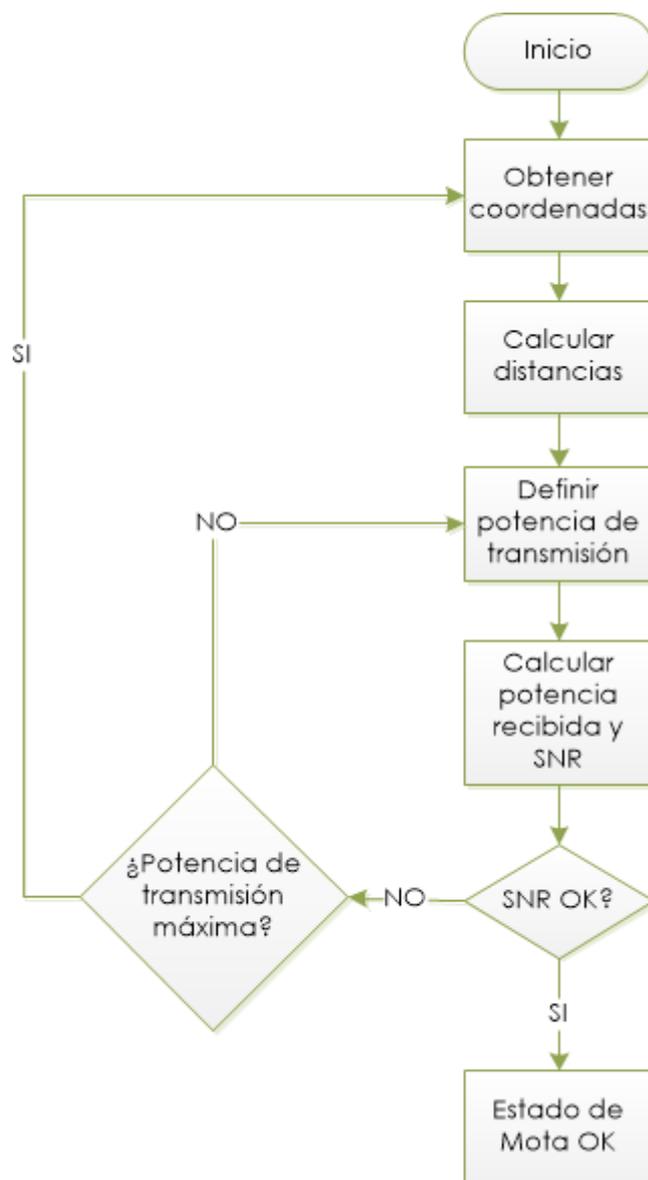


Figura 3.3 Diagrama de flujo del algoritmo a seguir

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se explicará el diseño de la mota con todos sus elementos. Luego se realizarán simulaciones de 3 escenarios con distintas condiciones de ruido, para determinar la mejor ubicación de las motas.

4.1 Ubicación geográfica del sitio del diseño

La ubicación geográfica de donde se realizó el estudio se encuentra especificada en la table 3, se trata de un edificio del centro de la ciudad, para ser específicos, el edificio San Francisco 300, ubicado en las calles Córdova y 9 de Octubre.

LATITUD	LONGITUD
2°11'30.9"S	79°52'52.8"W

Tabla 3: Coordenadas del edificio San Francisco 300

4.2 Diseño de la mota

En el diseño de la mota se consideraron varios aspectos importantes, entre los cuales se mencionan la alimentación, el consumo de energía, sistemas de emergencia en caso de falta de energía eléctrica, sensores a utilizar y el circuito de programación para la ESP8266.

En la figura 4.1 se muestra el esquema que se utilizó para desarrollar la mota, en donde se detalla principalmente el hecho de la alimentación de 12 [V] que será utilizada para cargar la batería (sistema de respaldo) y un sistema de conmutación para cuando el sistema de alimentación primaria falle. Posteriormente se regulará el voltaje al nivel deseado (3.3 [V]) para alimentar el módulo ESP8266, su circuitería de programación y los sensores de la mota.

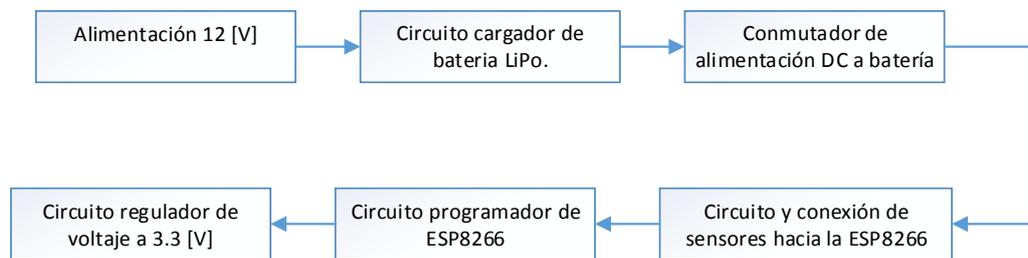


Figura 4.1 Diagrama de bloques del diseño de la moto.

En la figura 4.2 se muestra el circuito de alimentación en donde se utiliza un adaptador de 110 [Vac] a 12 [Vdc] que alimentará al nodo y en caso de que exista cortes de energía, la batería pasará a ser la proveedora de energía. Este circuito consta con indicadores rojo y verde para mostrar si la batería se encuentra con o sin carga.

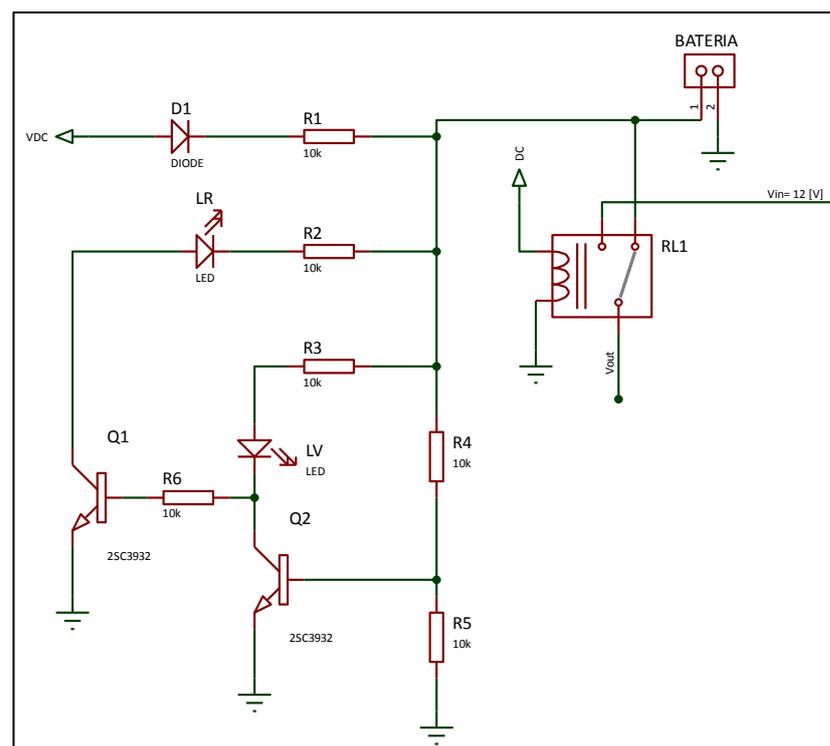


Figura 4.2 Circuito conmutador y de carga de batería.

En la figura 4.3 se muestra que, una vez considerada la alimentación principal, se procede a regular el voltaje de entrada para nivelarlo a la tensión a la cual trabaja tanto el módulo WiFi como los sensores (3.3 [V]).

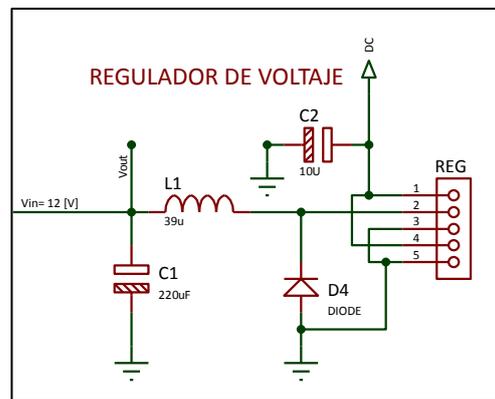


Figura 4.3 Circuito del regulador de voltaje.

Posteriormente, en la figura 4.4 se detalla cual es el circuito que se necesita configurar el módulo ESP8266 v12, es un circuito básico de programación, en donde, con el led indicador, se mostrará cuando se esté programando (encendido intermitente).

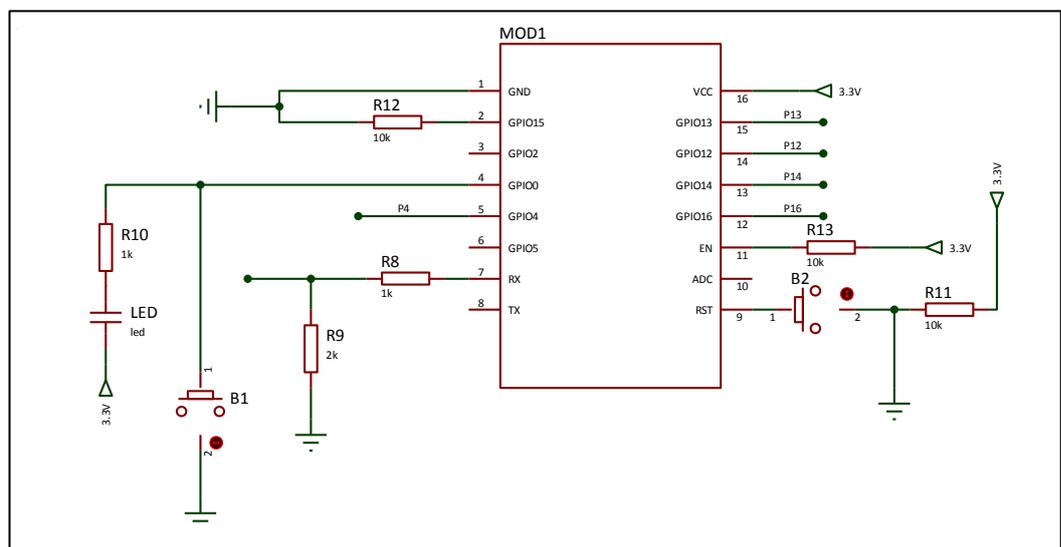


Figura 4.4 Circuito programador de la ESP8266.

En la figura 4.5 se muestra que el modulo WiFi seleccionado, cuenta con un adaptador de antena omnidireccional (conector IPEX) que permite mejorar la transmision de acuerdo a lo requerido.

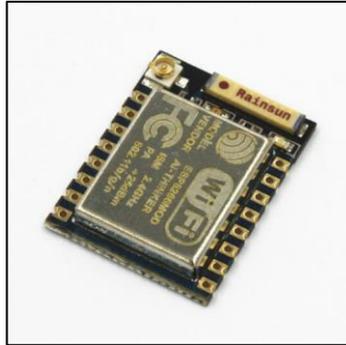


Figura 4.5 Módulo ESP8266 v12.

Adicionalmente, en la figura 4.6 se muestran los sensores a utilizar, es importante recalcar que dichos elementos no representan grandes dimensiones por lo que hacen del diseño lo mas pequeño y vistoso posible.

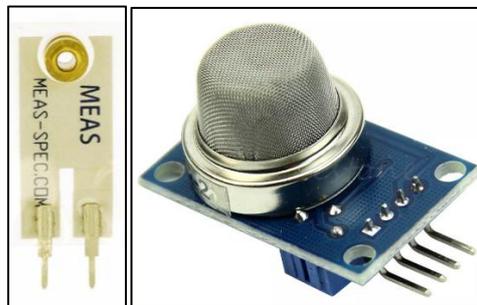


Figura 4.6 Sensores de vibración y humo respectivamente.

En la figura 4.7 se detalla la forma en la cual los sensores deben ser conectados al módulo ESP8266, considerando, el arreglo electrónico que requiere cada uno (alimentación) y a que puerto del módulo se conectarán.

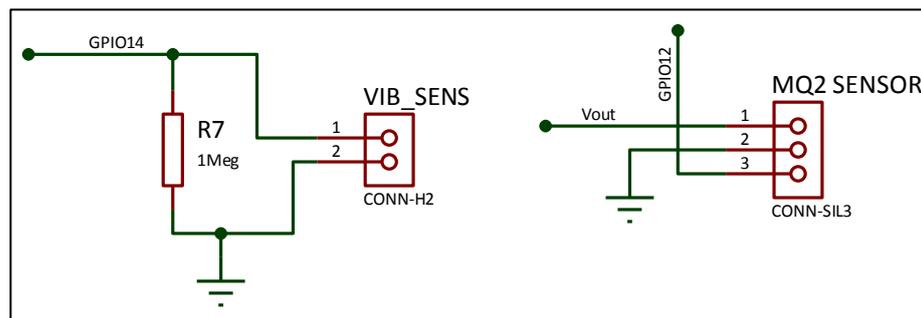


Figura 4.7 Configuración de los sensores de la mota.

Finalmente en la figura 4.8 se muestra el diseño final de la PCB del nodo para la WSN a realizar, en donde, se muestran los conectores y elementos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema.

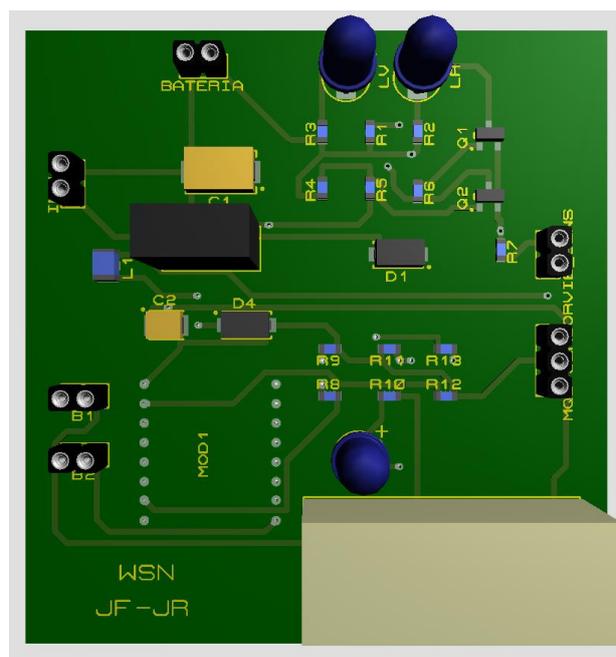


Figura 4.8 Diseño de mota para WSN a implementar.

4.3 Parámetros de configuración

Para realizar la simulación del escenario anteriormente descrito, se utilizarán los valores presentados en la tabla 4. Con dichos valores se obtendrán las velocidades de transmisión de los enlaces de cada nodo, y se podrá analizar el comportamiento de los mismos. La potencia de transmisión y ganancias de antenas fueron tomadas de la hoja de datos del módulo ESP266, la frecuencia de operación es un requerimiento del proyecto el operar en esta banda no licenciada. Las potencias de ruido fueron tomadas de un estudio de ruido para la banda de 2.4 GHz realizado en la ESPOL. Las pérdidas se obtuvieron del modelo COST 231 Keenan y Motley.

Parámetro	Valor	Unidad
Potencia de Transmisión	20	dBm
Ganancia de antena transmisora	10	dBi
Ganancia de antena receptora	10	dBi
Frecuencia de operación	2.45	GHz
Potencia de ruido alta	-77	dBm
Potencia de ruido media	-84	dBm
Potencia de ruido baja	-91	dBm
Pérdidas por pisos	27	dB
Pérdidas por paredes ligeras	4	dB
Pérdidas por paredes gruesas	12	dB

Tabla 4: Parámetros para simulación de escenarios

Los valores de SNR, tasa de datos y sensibilidad, serán tomados de acuerdo al estándar IEEE 802.15.4, los mismos que se especifican en la tabla 5. [31]

Tasa de datos (kbits/seg)	SNR (dB)	Sensibilidad (dBm)
250	3	-99
500	6	-96
1000	9	-93
2000	12	-90

Tabla 5: Velocidades típicas de acuerdo al SNR para un nodo

4.4 Análisis de resultados

4.4.1 Simulación en Matlab de los escenarios

En las figuras que se presentan a continuación los nodos están representados por triángulos de color azul. La velocidad de los enlaces se encuentra representada según la tabla 6.

Velocidad (kbps)	Color
250	Magenta
500	Verde
1000	Negro
2000	Azul

Tabla 6: Velocidades y colores para simulación en Matlab

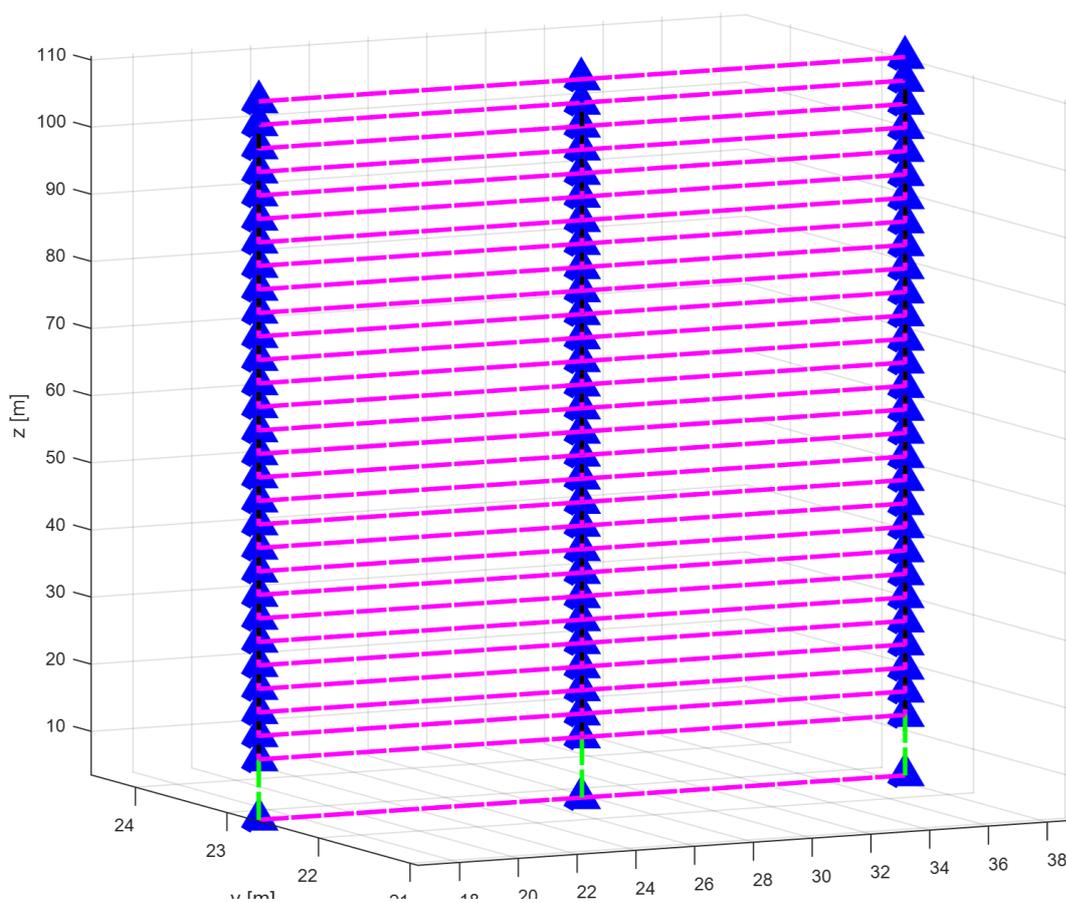


Figura 4.9 Escenario ruidoso -77dBm

En la gráfica 4.9 se presenta el escenario más ruidoso, con potencia de ruido -77dBm, en este caso las motas (triángulos de color azul) se encuentran conectadas en su mayoría a velocidades de 250kbps. Además, se puede apreciar como los nodos ubicados a una misma altura logran conectarse entre sí y también con los que se encuentran a 1 nivel arriba o abajo respectivamente.

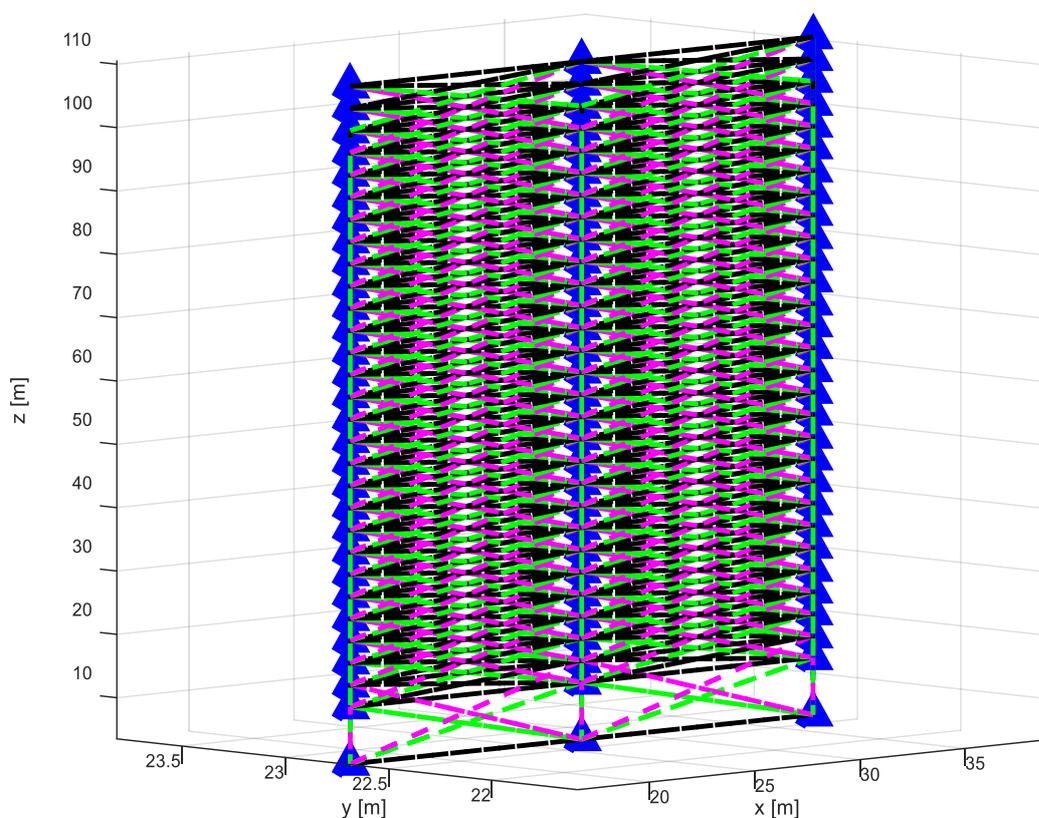


Figura 4.10 Escenario ruido medio -84 dBm

Para las condiciones de ruido medio con potencia de ruido de -84dBm, se muestra en la figura 4.10 como aparecen mejores velocidades en los enlaces, llegando hasta 1Mbps (líneas de color negro). A diferencia de la figura 4.9 en esta los nodos ya se conectan con más de 1 nodo en los niveles superiores o inferiores. Esto brinda mayor redundancia a la red.

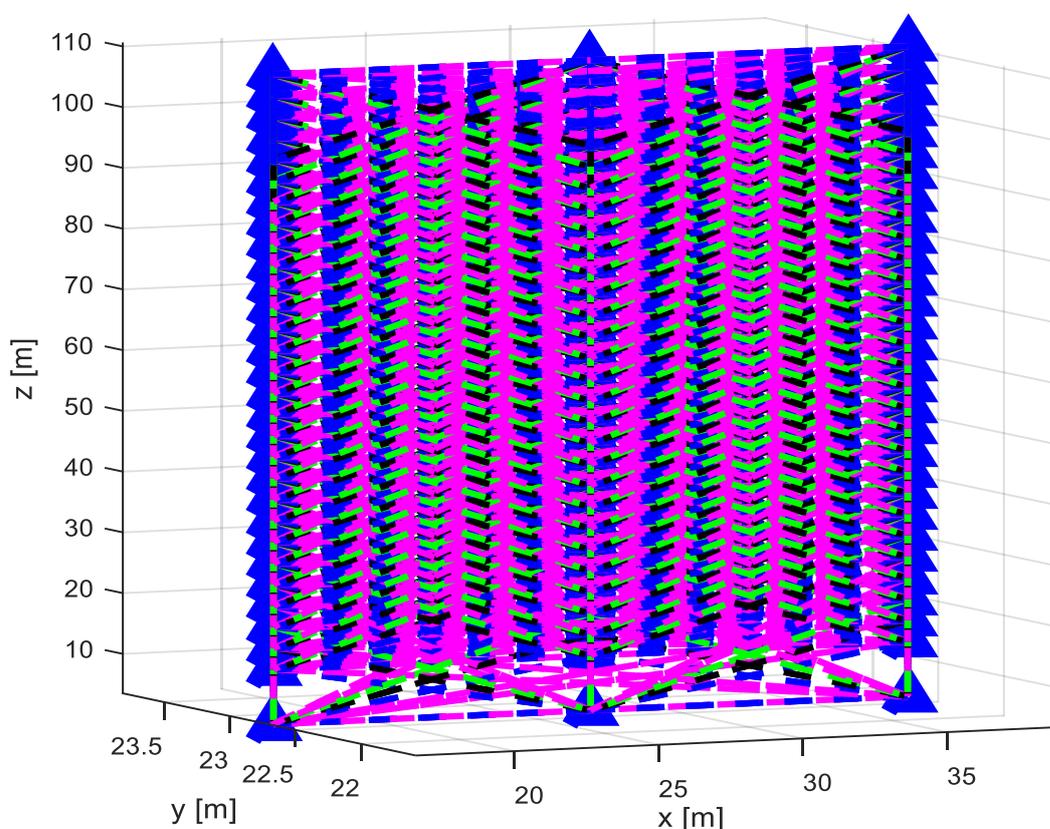


Figura 4.11 Escenario ruido bajo -91 dBm

En la figura 4.11 se aprecia el caso con la potencia de ruido más baja - 91dBm, como se puede notas existen enlaces de hasta 2 Mbps, las condiciones del escenario permiten también que los nodos puedan conectar a mejores velocidades y con nodos a niveles más superiores o inferiores, brindando el caso con mayor redundancia de los 3 presentados.

4.4.2 CDF's para cada escenario

En esta sección se realizará un estudio de las capacidades de canal para diferentes escenarios, los cuales, diferirán uno con respecto al otro, en base a la potencia de ruido que presenten. El escenario físico como tal, será el edificio San Francisco 300, en el cual se ubicaron los nodos (3 por piso) y en base al modelo de propagación utilizado, se pudo construir la curva de distribución acumulada para cada caso.

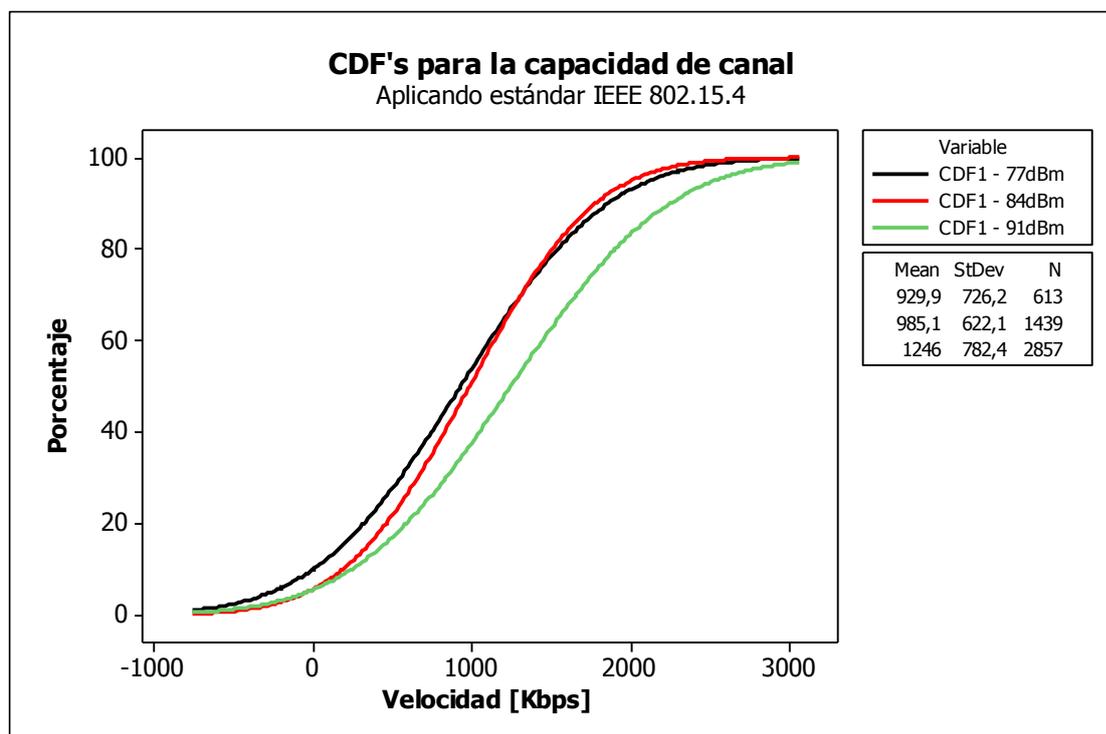


Figura 4.12 CDF 1 Con capacidad de canal estándar IEEE 802.15.4

Se puede apreciar en la figura 4.12 la media para el escenario con menor de potencia ruido, es la mayor de las 3, ya que en dicho caso es donde hay mayor cantidad de enlaces con las mejores velocidades. Para los escenarios de con potencias de ruido alta y media se puede ver que el 60% de los enlaces se encuentra con velocidades iguales o menores a 1 Mbps, se evidencia como influye negativamente el ruido en la velocidad de los enlaces.

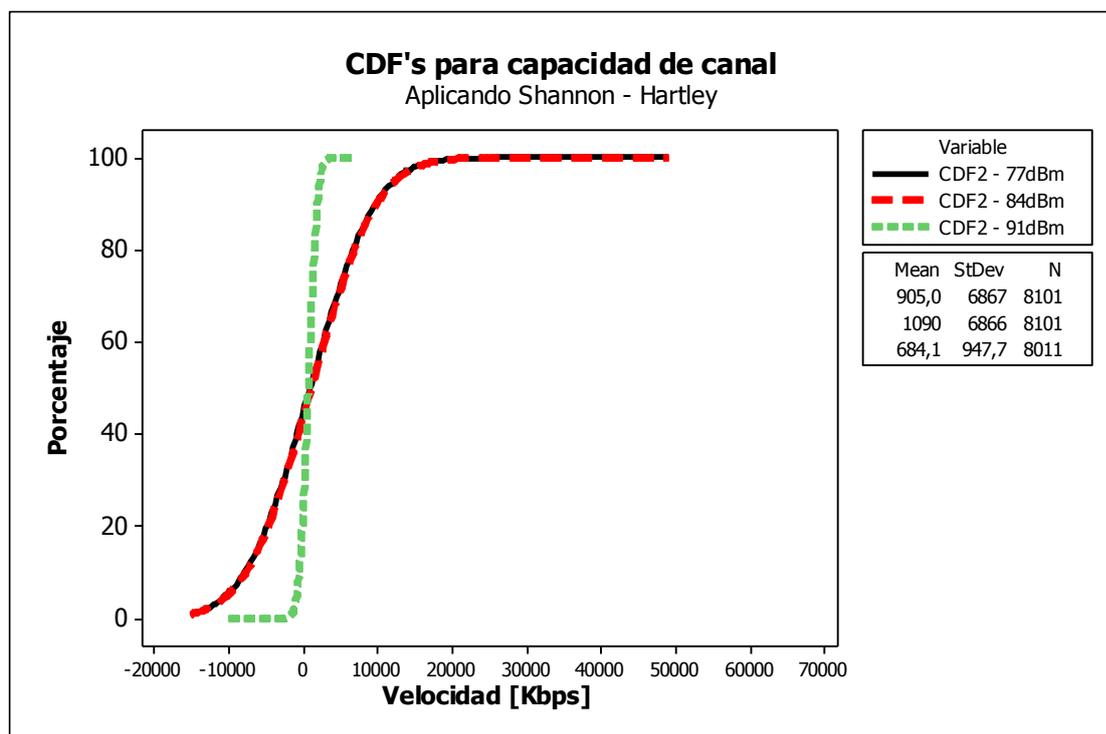


Figura 4.13 CDF 2 Capacidad de canal teórica

En la figura 4.13 se puede ver como las curvas correspondientes a los escenarios con alto y medio ruido tienen un comportamiento muy similar. Sus valores de desviación estándar son altos, mientras que, para la curva de menor potencia de ruido, el valor es el más bajo. Esto nos muestra que para este último caso los nodos se encontrarán conectados a velocidades con las menores variaciones de los 3 casos.

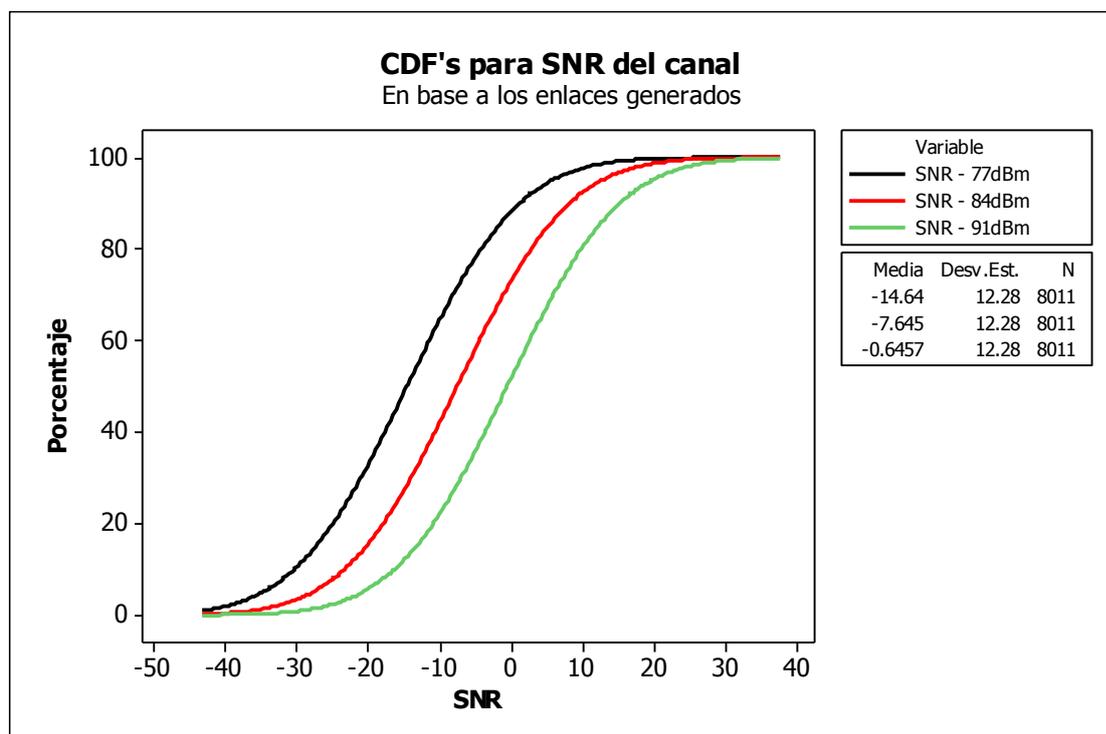


Figura 4.14 CDF para los valores de SNR

En la figura 4.14 se puede observar como la curva de color negro tiene valores de SNR bajos, pues es el caso más crítico donde los niveles de ruido son altos. Para el caso con ruido medio, se aprecia como la gráfica de color rojo tiene mejores valores de SNR, es decir más altos que para el caso anterior. Por último, en la gráfica de color verde se aprecia cómo ha mejorado notablemente los valores de SNR, pues en este caso tenemos el menor nivel de ruido.

4.4.3 Gateway de la WSN

Una vez diseñada la WSN y puestos en la respectiva configuración, es importante manejar el tráfico de la información que los sensores en cada nodo proporcionan. El Gateway proporcionará un buen medio de transporte entre la WSN y la nube, pudiendo así, mantener comunicado el edificio con el exterior.

En lo que respecta al diseño del Gateway, para la WSN a implementar se hará uso de la ESP8266 en conjunto con una nRF24L01. En el edificio en

cuestión, se encuentran ubicada una radio base de telefonía móvil (CLARO) mediante la cual se hará el enlace hacia la nube. Una vez configurado el Gateway, solo se necesitará conocer el ancho de banda que requiere el mismo, el cual, de acuerdo al diseño de la red a implementar, produjo como enlace más significativo uno de 2 [Mbps], vínculo con más alta tasa de datos de acuerdo a las simulaciones realizadas. Esta conexión a la nube permitirá acceder de manera rápida y remota al estado estructural de la edificación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Disponer de una WSN permite conocer varios parámetros de una edificación, sin necesidad de estar en ella, ya que se puede acceder a sus datos a través de internet. En el diseño de la misma, la utilización de repetidoras para un ambiente de interiores como en una edificación, permite bajar los niveles de potencia de transmisión y brinda redundancia a la red.

Debido a las condiciones de ruido presentes en la banda de 2.45 GHz la WSN diseñada tiene velocidades bajas para nodos con mucha separación, lo que indica principalmente un retardo en la transferencia de información; lo cual no afecta en mayor medida el objetivo principal que es el de poder censar y almacenar la información de la edificación.

Complementar la red de sensores en un edificio con una red de sensores a lo largo de zonas estratégicas para la detección de posibles movimientos telúricos puede representar todo un sistema de alerta temprana con una antelación de inclusive varios minutos para poder alertar mediante medios de comunicación o mediante la red celular.

Manejar los conceptos y protocolos de Open Source para el Internet de las cosas sería la manera más adecuada de diseñar soluciones a bajo costo y con gran relevancia, sin mencionar el hecho de una escalabilidad enorme frente a soluciones existentes en el mercado.

Hacer uso de los recursos de telefonía móvil, fibra óptica o simples radio enlaces en los lugares en donde se hará el despliegue de la red WSN, puede aportar en gran medida a una mejor interacción de lo que ocurre en la red y la exteriorización con un ente coordinador fuera de la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Aragón, L. Flores and Ó. López, Manual del formato de captura de datos para evaluación estructural, 1st ed. Ciudad de México: CENAPRED, 2011, pp. 19-40.
- [2] Diario El Universo. (2016, abril 16). Terremoto de 7,8 de magnitud sacude zona costera de Esmeraldas, en Ecuador [Escrito]. Disponible en: <http://www.eluniverso.com/noticias/2016/04/16/nota/5527437/terremoto-65-magnitud-frente-costas-esmeraldas>
- [3] Diario El Comercio. (2016, abril 19). 243 edificaciones de Guayaquil registran daños parciales tras el terremoto [Escrito]. Disponible en: <http://www.elcomercio.com/actualidad/edificaciones-guayaquil-registran-danos-terremoto.html>
- [4] Ambher™, (). Kit de Monitoreo Estructural y Sísmico en Edificios [Online]. Disponible en: <http://www.ambher.com/kit-de-monitoreo-estructural-y-ssmico-en-edificios/>
- [5] D. Muriá, B.D. Aldama y S.Loera, “Alerta Estructural Para Edificios Instrumentados”. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, México, 2009, pp. 2-9.
- [6] BBC, (2016, abril 23). El secreto de los edificios que no se cayeron durante el terremoto del Ecuador [Digital]. Disponible en: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160422_ecuador_terremoto_problemas_construcciones_arquitectura_ab
- [7] California Institute of Technology, (2007). Earthquake Early Warning [Online]. Disponible en: <http://www.eew.caltech.edu/>
- [8] Japan Meteorological Agency, (2007, octubre 1). Earthquake Early Warning System [Online]. Disponible en: <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eew1.html>
- [9] Universidad Politécnica de Madrid, (2014). City of the future - Smart Cities [Online]. Disponible en: <http://cityofthefuture-upm.com/research/smart-cities/>

- [10] WonderWare Spain, (2013). "Vive la ciudad inteligente" [Online]. Disponible en: <http://www.creatingmartcities.es/>
- [11] Building Efficiency Initiative, (2001, Abril 5). What is a Smart Building? [Online]. Disponible en: <http://www.buildingefficiencyinitiative.org/articles/what-smart-building>
- [12] Smart Building, (2016, Junio 15). El premiado edificio de Rotterdam tiene fachadas de Wicono [Online]. Disponible en: <http://www.smartbuilding.city/>
- [13] Inside, (2010, Febrero). Singapore's first intelligent building turns 10 [Online]. Disponible en: <http://inside.capitaland.com/spaces/city/359-singapores-first-intelligent-building-turns-10>
- [14] National Instruments, (2009, abril 22) ¿Qué es una red de sensores inalámbricos? [Online] Disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/7142/es/>
- [15] J. Capella, "Redes Inalámbricas de Sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos", Ed. Universitat Politècnica de Valencia, 2010, pp 27-30.
- [16] I.F. Akyildiz and M.C. Vuran, "WSN Architecture and Protocol Stack" en Wireless Sensor Network, Wiley. United Kingdom,2010,pp. 10-14.
- [17] [1]"¿Que es un sensor?", Profesormolina.com.ar, 2013. [Online]. Disponible en: http://www.profesormolina.com.ar/tecnologia/sens_transduct/que_es.htm.
- [18] [3]"What is end user?", *WhatIs.com*, 2016. [Online]. Disponible en: <http://whatis.techtarget.com/definition/end-user>.
- [19] [2]"What is gateway?", *IoT Agenda*, 2016. [Online]. Available: <http://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/gateway>.
- [20] K. Pahlavan and A.H. Levesque, "Topology, Medium Access and Performance" en Wireless Information Network, Wiley-Intersence. New Yersey, 2005,,pp. 501-506.
- [21] A. Munir, "Wireless Sensor Network: A Survey", University of Florida, no date.
- [22] CONATEL, 'Plan Nacional de Frecuencias', 2012 [Online]. Disponible en: http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/plan_nacional_frecuencias_2012.pdf

- [23] Espressif Systems, "ESP8266EX Datasheet", () [Online]. Disponible en: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2471/0A-ESP8266__Datasheet__EN_v4.pdf
- [24] Switchtel, "Detector Sísmico Secty Lifepatron MASTER" [Online]. Disponible en: <http://alertadeterremotos.cl/index.php?id=65>
- [25] J.M. Linares, "Simulación e Implementación de una red de sensores inalámbrica multiasalto para la medición de consumo energético en un edificio", Tesis, EETAC,UPC,Barcelona,España, 2014.
- [26] Amber TM,(2014). Monitoreo de Edificios CX1 [Online]. Disponible en: <http://www.ambher.com/monitoreo-de-edificios-cx1/>
- [27] Japan Meteorological Agency. (2010). Earthquake Early Warning System [Online]. Disponible en: <http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eew.html>
- [28] El Comercio (2014/05/23), "Guayaquil cuenta con más edificios" [Online]. Disponible en: <http://www.elcomercio.com/galerias/actualidad/guayaquil-edificios-crecimiento-urbano.html>
- [29] N. Pérez, C.Pabón, J.R. Uzcátegui and E. Malaver, "Nuevo Modelo de Propagación Para Redes WLAN Operando en 2.4Ghz, en ambientes interiores," Revista Electrónica de Estudios Telemáticos,vol 3,no. 3, pp 4-5,Noviembre, 2010.
- [30] Eveliux. Teorema de la máxima capacidad de Shannon. [Online]. Disponible en: <http://www.eveliux.com/mx/Teorema-de-la-maxima-capacidad-de-Shannon.html>
- [31] Adjacent Channel Rejection Measurements for 802.15.4 Radios Application Note 5059, Ember Corporation, 27 March 2009.

ANEXOS

Anexo 1: Glosario de términos

WSN:	Wireless Sensor Network, red de sensores inalámbricos utilizados para monitorear entornos.
Smart City:	Ciudad inteligente, se considera a una ciudad que ha implementado sistemas eficientes para su administración, haciendo uso de las TICs.
TIC:	Tecnología de la Información y Comunicación, son todas las herramientas informáticas que permiten mejorar el estilo de vida de un individuo.
IoT:	Internet of Things, es conectar elementos de la vida cotidiana a internet, para poder acceder a ellas remotamente.
SNR:	Signal to Noise Ratio, es la relación existente entre las potencias de señal y ruido.
CDF:	Comulative Distribution Function, expresa la probabilidad acumulada correspondiente a una distribución.
Gateway:	Puerta de enlace, es la interfaz que permite comunicar una red con otra.
SOC:	System on a Chip, es la integración de todos los elementos de un cierto sistema, en un solo chip.

Anexo 2: Código empleado para realizar la simulación de los enlaces entre los diferentes nodos dispuestos para la red WSN.

```

%%                                CODIGO PARA SIMULACIÓN
%% AUTORES:
%%   - Jorge Francois Fernández Rivadeneira
%%   - Jorge Luis Ramírez Gómez

clear all,close all,clc %% se limpia la pantalla

```

```

%% Determinar sensores %%
num_ap=90; % Se ingresa el número de sensores que se desean simular

%% En esta sección se ingresan las ubicaciones correspondientes a los
sensores

P=[16.72 22.7 3.5 ; 27.72 22.7 3.5 ; 38.72 22.7 3.5 ; 16.72 22.7 12.5 ;
27.72 22.7 12.5 ; 38.72 22.7 12.5 ; 16.72 22.7 16 ; 27.72 22.7 16 ; 38.72
22.7 16 ; 16.72 22.7 19.5 ; 27.72 22.7 19.5 ; 38.72 22.7 19.5 ; 16.72 22.7
23 ; 27.72 22.7 23 ; 38.72 22.7 23 ; 16.72 22.7 26.5 ; 27.72 22.7 26.5 ;
38.72 22.7 26.5 ; 16.72 22.7 30 ; 27.72 22.7 30 ; 38.72 22.7 30 ; 16.72 22.7
33.5 ; 27.72 22.7 33.5 ; 38.72 22.7 33.5 ; 16.72 22.7 37 ; 27.72 22.7 37 ;
38.72 22.7 37 ; 16.72 22.7 40.5 ; 27.72 22.7 40.5 ; 38.72 22.7 40.5 ; 16.72
22.7 44 ; 27.72 22.7 44 ; 38.72 22.7 44 ; 16.72 22.7 47.5 ; 27.72 22.7 47.5
; 38.72 22.7 47.5 ; 16.72 22.7 51 ; 27.72 22.7 51 ; 38.72 22.7 51 ; 16.72
22.7 54.5 ; 27.72 22.7 54.5 ; 38.72 22.7 54.5 ; 16.72 22.7 58 ; 27.72 22.7
58 ; 38.72 22.7 58 ; 16.72 22.7 61.5 ; 27.72 22.7 61.5 ; 38.72 22.7 61.5 ;
16.72 22.7 65 ; 27.72 22.7 65 ; 38.72 22.7 65 ; 16.72 22.7 68.5 ; 27.72 22.7
68.5 ; 38.72 22.7 68.5 ; 16.72 22.7 72 ; 27.72 22.7 72 ; 38.72 22.7 72 ;
16.72 22.7 75.5 ; 27.72 22.7 75.5 ; 38.72 22.7 75.5 ; 16.72 22.7 79 ; 27.72
22.7 79 ; 38.72 22.7 79 ; 16.72 22.7 82.5 ; 27.72 22.7 82.5 ; 38.72 22.7
82.5 ; 16.72 22.7 86 ; 27.72 22.7 86 ; 38.72 22.7 86 ; 16.72 22.7 89.5 ;
27.72 22.7 89.5 ; 38.72 22.7 89.5 ; 16.72 22.7 93 ; 27.72 22.7 93 ; 38.72
22.7 93 ; 16.72 22.7 96.5 ; 27.72 22.7 96.5 ; 38.72 22.7 96.5 ; 16.72 22.7
100 ; 27.72 22.7 100 ; 38.72 22.7 100 ; 16.72 22.7 103.5 ; 27.72 22.7 103.5
; 38.72 22.7 103.5 ; 16.72 22.7 107 ; 27.72 22.7 107 ; 38.72 22.7 107 ;
16.72 22.7 110.5 ; 27.72 22.7 110.5 ; 38.72 22.7 110.5];
P=P'; % Se pasa de un vector fila a un vector columna

%% En esta sección se establecen las potencias, ganancias y frecuencia de
operación

Pt=20; % Potencia de transmisión en [dBm]
Gt=10; % Ganancia de antena transmisión [dBi]
Gr=10; % Ganancia de antena receptora [dBi]
f=2450e6; % Frecuencia de operación [Hz]
Pnoise=-91; % Potencia de ruido [dBm]

%% En esta sección se establecen parámetros para el grafico
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 %% Se
etiquetan los ejes para la grafica

%% En esta sección se determinan las distancias entre los sensores %%
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

%% En esta sección se determina las pérdidas de propagación utilizando
Modelo COST 231 %%
n_f=1; %% Número de pisos que atraviesa la señal
n_w=1; %% Número de paredes que atraviesa la señal
L_0=(33*log10(1/8)+58.5); %% Perdida de espacio libre a 1m de distancia
L_w=0; %% Variable de acumulación para pérdidas por paredes

```

```

L_f=0; %% Variable de acumulación para pérdidas por pisos

%%Pérdidas por pisos
for q=1:1
    L_f= L_f + n_f*27;
end

%%Pérdidas por paredes
for q=1:2
    if q==1
        L_w= L_w + n_w*4;        %%Pérdidas en paredes ligeras
    else
        L_w= L_w + n_w*12;      %%Pérdidas en paredes gruesas
    end
end

L=-(L_0 + 10*4*log10(d)+ L_f + L_w);    %% Pérdida total
Pr=Pt+Gt+Gr+L;                        %% Potencia de recepción [dB]
S_N=Pr-Pnoise;                         %% Relación señal a ruido SNR

%% En esta sección se calcula la tasa de datos de los enlaces entre nodos,
según su nivel de SNR
%% Los 4 siguientes valores presentados a continuación servirán de criterio
de decisión
S_N_1=3;
S_N_2=6;
S_N_3=9;
S_N_4=12;

B=3e6;        %% ancho de Banda
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

%% En esta sección se calcula la capacidad de canal máxima de los enlaces,
utilizando el teorema de Shannon

```

```

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

%% En esta sección se obtienen los datos para generar 3 CDFs, estas CDFs son
para capacidad de canal y SNR
CDF1=0;
CDF2=0;
SNR=0;

%%          Capacidad de canal 1
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (CC(i,j)~=0)
            CDF1=[CDF1;CC(i,j)];
        end
    end
end
%%          Capacidad de canal 2
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (CC_2(i,j)~=0)
            CDF2=[CDF2;CC_2(i,j)];
        end
    end
end
%%          SNR
for i=1:num_ap
    for j=1:num_ap
        if (S_N(i,j)~=0)
            SNR=[SNR;S_N(i,j)];
        end
    end
end
end

```

En primer lugar, se determina el número de AP's que estarán presentes en la red. Luego de ello se ingresan las ubicaciones de cada uno de ellos. Se procede a ingresar los valores de potencia de transmisión, ganancia de antena de transmisión, recepción y frecuencia. El siguiente valor a ingresar es la potencia de ruido, la misma que variará de acuerdo a cada escenario.

Se procede a graficar cada mota en su ubicación, luego se calcula la distancia entre cada una de ellas y se almacenan en la matriz d. Ahora se indica el modelo de propagación a utilizar, el COST 231. Una vez calculada esta pérdida, se determina la potencia de recepción y SNR. Con los valores de SNR se calcula la capacidad de canal para casa enlace, y de ser favorable dicho valor, se grafica el enlace con el color que le corresponda. Por último, se vuelve a calcular la capacidad de canal utilizando el teorema de máxima capacidad de Shannon y se almacena en la matriz CC_2.

Anexo 3: Valores de capacidad de canal y SNR para los enlaces entre los nodos 4, 5 y 6, para el escenario con mayor ruido -77dBm.

A continuación, se presentan los valores de capacidad de canal obtenidos en la simulación en Matlab, para los nodos 4,5 y 6.

Nodos	4	5	6
4	0	250	0
5	250	0	250
6	0	250	0

Tabla 7: Capacidad de canal en kbps nodos 4,5 y 6.

En la tabla 7 se puede apreciar cómo los 3 nodos a pesar de encontrarse en el mismo piso, no son capaces de conectarse todos directamente entre sí. Los nodos 4 y 6 no tienen un enlace directo entre ellos, pero puede alcanzar el uno al otro, a través del nodo 5, quien hace las veces de puente entre ellos.

A continuación, se presentan los valores de SNR obtenidos en la simulación en Matlab, para los nodos 4,5 y 6.

Nodos	4	5	6
4	∞	3.64	-8.39
5	3.64	∞	3.64
6	-8.39	3.64	∞

Tabla 8: SNR en dB para nodos 4,5 y 6.

La tabla 8 muestra como los nodos más lejanos entre sí, 4 y 6, tienen valores negativos de SNR; por lo cual no es posible levantar el enlace directo entre ellos. Gracias a la simetría del diseño de la red, los valores de SNR útiles para levantar los enlaces, entre los nodos 4 - 5, y entre 5 - 6, son los mismos.