



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA RED DE SENSORES
INALÁMBRICOS PARA LA PREVENCIÓN DE
INCENDIOS FORESTALES EN EL BOSQUE
PROTECTOR CERRO COLORADO EN LA CIUDAD DE
GUAYAQUIL”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y

TELECOMUNICACIONES

ELIANNI JARITZA BARZOLA SOLÓRZANO

JOSE LEONARDO CUADRADO GAGÑAY

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a Dios por la oportunidad de vida que me ha regalado cada día, mi profundo agradecimiento a mis padres por haberme apoyado siempre, ya que gracias a su aporte he llegado a cumplir una de mis metas. A mi esposo, por la compañía brindada en logro alcanzado. Finalmente, a la universidad por haberme formado profesionalmente y enseñado a desenvolverme de la mejor manera en el ámbito laboral.

Elianni Barzola Solórzano

Mi más sincero agradecimiento a Dios por cada día de vida, a mi amada esposa por ser mi apoyo constante e incondicional para poder cumplir con mis objetivos y metas, a mis padres por brindarme siempre sus palabras de ánimo y darme fuerzas para seguir adelante, a mi familia por sus consejos y aprecio. Expreso mi gratitud a mis maestros de ESPOL por transmitirme sus conocimientos y haberme guiado durante mi vida universitaria. De manera especial al Ms. Washington Adolfo Medina Moreira mi infinito agradecimiento por su valiosa colaboración para la realización de éste proyecto. A mis amigos por su confianza y lealtad en este arduo camino para llegar a ser un profesional.

José Cuadrado Gagñay

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis dos princesas, Emma y Nicole. Ellas han sido la fortaleza para trabajar día y noche por alcanzar esta meta. A mi esposo, Marcelo Bonilla, por estar conmigo en todo momento. Finalmente, a mi madre Darling Solórzano y a mi padre José Barzola por sus palabras sabias en los momentos más difíciles y por ser ese pilar fuerte en toda esta etapa.

Elianni Barzola Solórzano

Dedico este trabajo a Dios por cada día de vida y por darme la sabiduría y capacidad; a mi esposa por brindarme su apoyo incondicional día a día, a mis Padres por todos los valores inculcados durante mi vida, a mis hijos, ya que son parte de motivación para cada día ser mejor y salir adelante, a mi familia por sus consejos y aprecio, y a todas las personas que estuvieron presente con sus palabras de ánimo para no claudicar y seguir adelante.

José Cuadrado Gagñay

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

MSc. Washington Medina

PROFESOR EVALUADOR

PhD. German Vargas

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"

Elianni Jaritza Barzola Solórzano

José Leonardo Cuadrado Gagñay

RESUMEN

Los incendios forestales se han convertido, en los últimos años, en un inconveniente a nivel mundial, ya que cada día por diversas razones (tanto climáticas como ignorancia del ser humano o pirómanos) son más frecuentes, causando daños irreversibles para el ecosistema. La probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal aumenta en época de verano, consumiendo todo a su alrededor. Los daños económicos son, en muchas ocasiones, incalculables y más aún en lo que respecta a la recuperación de las zonas boscosas afectadas. Existen varios métodos de prevención y alarma contra incendios forestales, métodos que van desde guarda bosques hasta imágenes satelitales que determinan la presencia de un área en llamas.

La presente investigación propone el Diseño de una Red de Sensores Inalámbricos para prevenir la propagación de un incendio forestal en el Bosque Protector Cerro Colorado, mediante el cual se extraerá y procesará datos tomados por sensores de temperatura, humedad relativa, monóxido y dióxido de carbón. Los sensores se comunicarán inalámbricamente hacia un servidor, el cual se encargará de enviar los datos a internet.

La simulación del despliegue de cada sensor de la red previamente diseñada permitió el análisis de su comportamiento en presencia de ruido con diferentes niveles de potencia para poder determinar la máxima potencia de ruido que la red de sensores inalámbricos podría tolerar. El umbral hallado es de -90 dBm, es decir, que en presencia de ruido con dicha potencia la red mantiene su estabilidad y eficiencia.

Finalmente se concluyó que el diseño es eficiente, ya que el umbral determinado es mayor a la potencia de ruido media en sectores sub urbanos como el Bosque Protector Cerro Colorado.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN	iv
DECLARACIÓN EXPRESA	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE	vii
1. GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 Metodología	6
1.6 Alcance	7
1.7 Estado del Arte	8
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)	13
2.1.1 Características de una WSN	14
2.1.2 Elementos de una WSN	17
2.2 Estándar IEEE 804.15.4	26
2.3 Tecnología Zigbee	32

2.4	Módulos Xbee.....	35
2.5	Modelos de Propagación	38
2.6	Incendios Forestales	40
2.6.1	El Fuego.....	40
2.6.2	Incendios Forestales	41
2.6.3	Variables a considerar Previas y durante un incendio forestal...42	
3.	METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA RED INALÁMBRICA.....	43
3.1	Descripción del escenario	44
3.2	Diagrama de Bloques de la WSN	45
3.3	Elección del Estándar de Comunicación Inalámbrica.....	47
3.4	Topología.....	48
3.5	Selección de elementos de la Red.....	49
3.5.1	Waspote.....	50
3.5.2	Sensores	64
3.5.3	Meshlium.....	71
3.6	Diseño de la WSN	73
3.6.1	Análisis Matemático	74
3.6.2	Localización geográfica de la red	82
4.	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	84
4.1	Algoritmo	84
4.2	Análisis de resultados	85
4.3	Variación del escenario.....	92
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
	Bibliografía.....	105

ANEXOS	110
ANEXO A: Tabla de coordenadas de los nodos	111
ANEXO B: Glosario de términos.....	114

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

En la actualidad, los incendios forestales están causando daños irreparables alrededor del mundo afectando principalmente a la naturaleza. En este capítulo se procederá a analizar las generalidades entorno a este problema enfocándose en el Ecuador.

1.1 Antecedentes

Los efectos de los incendios forestales sobre la ecología, la salud humana y las actividades económicas, han sido estudiados por entes internacionales desde hace más de dos décadas [1].

Según los reconocidos investigadores Ruiz y Gallardo “los incendios forestales son una de las principales causas de degradación medioambiental en los países mediterráneos”. Anualmente, ciento de miles de hectáreas son destruidas, teniendo consecuencias ambientales, económicas y sociales [1].

En los últimos cinco años, el escenario mundial en torno a las consecuencias de los incendios forestales ha variado considerablemente. Se han creado alianzas internacionales para el intercambio de experiencias entre expertos sobre las secuelas catastróficas que dejan los incendios forestales, a razón de la preocupación por la conservación de la biodiversidad, ya que esta ha sido influenciada por los resultados inalterables del “efecto invernadero” en el planeta. Además, se han desarrollado patrones y grandes bases de datos que tienen como intención modelar de forma espacial y temporal la liberación de gases, esto se da gracias a la enorme tasa de emisión de gases tóxicos a la atmósfera consecuente a los incendios forestales [2].

En el Ecuador, el sector forestal es de gran importancia, ya que regula ciclos importantes en el medio ambiente tales como: aire, suelos y agua. Por ende, el calentamiento global, la sedimentación, y la desertificación son efectos de

la mala utilización del mismo. Además, afecta a sectores estratégicos del país como la energía, agricultura, minas, turismo e investigación científica [3].

1.2 Planteamiento del problema

Pyne menciona que “El fuego, es un fuerte destructor de la capa arable del suelo” (tierra de cultivo), es decir, va llevando en su paso todas las propiedades que caracterizan al mismo, dejándolo empobrecido. El fuego se encuentra presente en muchos ecosistemas y paisajes a lo largo del mundo [4]. No obstante, su aparición y empleo dentro de los ecosistemas forestales es considerada de manera suma gravedad, por sus consecuencias, en áreas de manejo y conservación biológica [5].

Esto ha dado como resultado múltiples estudios respecto al comportamiento del mismo alrededor del mundo, especialmente en España, Estados Unidos, Canadá, China y Australia. Estos países han desarrollado y diseñado valiosas estrategias para controlar y aplacar incendios forestales basándose en dichos estudios, los cuales han permitido reconocer e integrar la ocurrencia de estos sucesos naturales en programas de reconstrucción, conservación y manejo [6].

En ambientes boscosos, las consecuencias de los incendios forestales afectan directamente a los procesos y mantenimientos del ecosistema, teniendo al hombre como el principal agente para provocar dichos incendios, a través de la intervención agresivamente descontrolada de la tala indiscriminada, imprudencia, desconocimiento y los detestables pirómanos. Particularmente, las quemaduras producidas por el ser humano, han terminado en incendios forestales monstruosos, que han producido, tristemente, pérdidas invalorables de grandes superficies boscosas y la modificación de varios procesos naturales. Esta actividad es que cada vez más frecuente, a esto se suma la explotación desmesurada de los recursos naturales y actividades ilegales [7].

En estudios recientes, se ha estimado que cada año se pierden entre 10 a 15 millones de hectáreas de bosques en regiones boreales y templadas, mientras que de 20 a 40 millones de hectáreas se pierden en bosques tropicales [1]. La explotación de los recursos de la tierra en grandes extensiones de superficie, han sido uno de los principales partícipes de incendios forestales, los cuales han tenido daños que son difíciles de cuantificar. Por ejemplo, sólo en el sudeste de Asia, se estima que los daños directos ocasionados por incendios forestales en la región, superan los 4500 millones de dólares anuales en promedio en los últimos 10 años, a esto se le suma el impacto que tiene en la salud del ser humano, debido a enfermedades respiratorias derivadas de las emisiones por incendios, tal como ha ocurrido en México, Honduras, Guatemala y en el sudeste de los Estados Unidos [7] .

En años recientes, debido a las altas tasas de deforestación y a los incendios forestales, anomalías climatológicas como las sequías e inundaciones de gran magnitud han afectado a algunas de las zonas bajas del Ecuador. La escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Agraria afirma que “El Ecuador tiene una utilización eventual del agua cuatro veces más alto por persona (43.500 m³) que el promedio mundial (10.800 m³/persona)”, por lo cual, cada vez que se presenta un incendio forestal, deja a su paso daños, no solo materiales, sino que afecta de manera directa e indirecta a la vida cotidiana del ser humano [8].

En el 2012, el Ecuador tuvo cerca de 5 mil hectáreas quemadas, en donde se vieron afectadas algunas zonas pastosas como los bosques secos en los valles, bosque húmedo tropical y plantaciones de pino en lo que ahora es el nuevo aeropuerto de Tababela y cerca de dos hectáreas de eucalipto en zonas aledañas. [9].

Cabe señalar que, los incendios forestales que han ocurrido en el Ecuador se han presentado a razón de causas antropogénicas, es decir, son el resultado de actividades humanas. Por ejemplo, en varias zonas agrícolas, el fuego es

utilizado como herramienta de trabajo para preparar la tierra, eliminar rastrojos y limpiar el terreno, entre otros, pero la mala utilización causa daños irreparables [10].

Según reportes del Ministerio del Ambiente, en el presente año, el 70% de incendios forestales son causados por el hombre, el 25% son por negligencia o por quemas agrícolas y el 5% por causas naturales (botellas de vidrio, rayos UV). Por ello, el Ministerio del Ambiente mediante su página web invita a la ciudadanía a que contribuya con la protección de estos espacios naturales abiertos y a la reforestación en los mismos.

El Bosque Protector Cerro Colorado tiene alrededor de 325.43 hectáreas, es una de las últimas reservas de la vegetación de bosques secos en el área de Guayaquil. Este bosque ha sufrido diversos tipos de intervenciones debido a la influencia de actividades como la tala de árboles para la extracción de madera, invasiones, cacería indiscriminada y sobre todo de varios incendios producidos por el hombre. Por lo tanto, es necesario el rescate de los recursos naturales que aún quedan, mediante la reforestación del ecosistema y la implementación de un Sistema de Sensores para la prevención de Incendios [9]. En la actualidad existen diversas maneras de prevención tales como: Llamar al 1800 DELITOS o al 911 y denunciar; Cámaras y Torres de vigilancia; guarda parques; campañas de sensibilización y semáforos de alerta.

1.3 Justificación

Las telecomunicaciones desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de nuevos sistemas que permitan prevenir y detectar desastres naturales que afectan a la población en general. Actualmente, el desarrollo tecnológico y la aparición de novedosos estándares de comunicación hacen que problemas como incendios forestales, que causan innumerables pérdidas, tengan nuevas y mejores alternativas de solución [10].

El diseño de dichas soluciones puede ser posible por medio de redes inalámbricas, las mismas hacen que el sistema sea competitivo ante soluciones ya existentes debido a las viables ventajas que tienen estas. Un ejemplo muy claro es la flexibilidad que posee, ya que son inalámbricas, por lo tanto, los costos de implementación y tiempo se reducen considerablemente, ya que antes de estructurar la red no habría que pensar en la distribución física de los equipos, sino que el área de implementación esté dentro del ámbito de la cobertura de la red [11]. Usar este tipo de comunicación hace que el sistema sea más robusto ante eventos inesperados.

La utilización de sensores es necesaria para el control ambiental, debido a que estos dispositivos permiten el monitoreo de una o algunas variables [12]. El uso de una red de sensores inalámbricos en un sistema de detección y prevención hace que este sea más eficiente debido a que cuentan con numerosos dispositivos electrónicos distribuidos estratégicamente en un área determinada para monitorear diversas condiciones o variables en distintos puntos [13].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de factores que afectan a la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales.

1.4.2 Objetivos Específicos

Analizar variables incidentes en la probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal para determinar variables a medir.

Realizar un estudio de campo en el Bosque Protector Cerro Colorado e identificar localización geográfica de las motas y nodos sensores.

Analizar la estructura de una red de sensores inalámbricos.

Analizar los distintos estándares de comunicación inalámbrica para una red de sensores WSN.

Seleccionar un estándar de comunicación y la topología de la red.

Investigar dispositivos electrónicos que se ajusten a las variables a medir, a los requerimientos del estándar seleccionado y que se ajusten a las condiciones climáticas presentes del Bosque Protector Cerro Colorado.

Seleccionar los dispositivos que se usarán como nodos sensores, motas y Gateway.

Seleccionar modelo de propagación.

Diseñar la red de sensores inalámbricos WSN para el escenario elegido.

Realizar análisis matemático basándose en un modelo de propagación seleccionado para determinar el alcance del nodo.

Evaluar la eficiencia de la red de sensores inalámbricos WSN mediante la simulación de capa física de la misma.

1.5 Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos, se ha elaborado un diagrama de proceso tal como se muestra en la Figura 1.1, de lo cual se detalla lo siguiente:

Como primer paso se realizará un análisis de las variables que se van a monitorear mediante los nodos de sensores para saber la probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal en un área determinado y así poder prevenir la propagación del mismo alertando a las autoridades competentes. Ya definidas las variables, se realizará el debido estudio de campo, el cual

permitirá hacer una descripción del escenario en donde se quiere diseñar la red. Es necesario hacer esto antes de investigar los dispositivos electrónicos ya que los mismos deben ser ideales para el escenario en donde se los desea implementar.

Se realizará un esquemático de la red para determinar los dispositivos electrónicos que se necesitará para el diseño, el estándar de comunicación y la topología. A razón de esto, se definirán los parámetros de cada uno de ellos para realizar el debido análisis matemático basándose en un modelo de propagación de acorde al escenario.

Se determinará el alcance de cada nodo sensor tomando en cuenta las pérdidas que ocasionará el escenario. Esto ayudará a determinar el número de nodos sensores que se necesita para cubrir el total del área que representa el escenario.

Luego de esto, se diseñará la red especificando la ubicación de cada dispositivo, se analizarán los resultados mediante la simulación de capa física de la misma, se evaluará el comportamiento de la red variando la potencia de ruido hasta encontrar el umbral de la red diseñada.

1.6 Alcance

Mediante la simulación de la red basándose en un entorno real de monitoreo, se espera que el diseño propuesto sirva para una futura implementación en el bloque 1 del Bosque protector Cerro Colorado. Además, puede ser tomado como modelo piloto para diseñar una WSN, *Wireless Sensor Network*, en diferentes bosques de la ciudad de Guayaquil, ya que el diseño propuesto se ha realizado basándose en los parámetros climatológicos de la misma sin considerar ambientes nublados o con lluvia.

Se busca que mediante el monitoreo continuo del entorno, la red tenga la capacidad de elaborar una base de datos óptima para la creación de un modelamiento estadístico, que permita predecir futuros comportamientos

sobre los factores que inciden en la probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal en un área determinado.

1.7 Estado del Arte

Existen interrogantes sobre la magnitud de los efectos de los incendios forestales, pero se ha pronosticado mediante estudios computacionales que los incendios forestales serán más frecuentes e intensos debido al cambio climático, ya que ayudarán a la iniciación y propagación del fuego ocasionando severos efectos para el ser humano [2], por lo que es necesario estudiar, diseñar y desarrollar nuevas alternativas para prevenir y detectar incendios.

Chile es uno de los países que ha sufrido en gran escala de incendios forestales, ya que posee aproximadamente 35 millones de hectáreas de vegetación vulnerable a incendios, el 99% de los incendios forestales han sido ocasionados por el ser humano y en la mayoría de ellos no se encuentran a los responsables [2]. Debido a esto tienen como solución apelar a la conciencia humana y fomentar responsabilidad en el uso del fuego. Además de esto han propuesto un sistema de índices de riesgo usando regresiones lineales múltiples con 5 variables independientes como: temperatura(X_1), humedad relativa(X_2), velocidad del viento(X_3), sequía(X_4) y estacionalidad(X_5); y como variable dependiente la probabilidad de ocurrencia [14]. Las mismas que vienen representadas en la fórmula 1.1.

$$Y = 17.6653 + 1.1692X_1 - 0.4387X_2 + 0.3473X_3 + 18.6882 - 0.2664X_5 \quad (1.1)$$

Hacen hincapié en la importancia de validar la información cada dos o tres años con datos de nuevas temporadas de ocurrencia de incendios forestales [14].

En algunos países como Estados Unidos, Canadá y Australia usan el método tradicional para monitorear incendios forestales, el cual consiste en tareas de supervisión desde una torre de vigilancia situada en un punto alto. Se han

propuesto técnicas de visión como sistemas de video-vigilancia automática para el control de bosques pequeños [15].

Otra técnica desarrollada actualmente se basa en imágenes de satélite como AVHRR y MRIS, con la cual existe una detección del incendio, siempre y cuando el fuego ya haya crecido. Con todas estas técnicas, se ha llegado a la conclusión que la información sensorial proporciona un monitoreo más amplio de incendios forestales, además, los nodos sensores se pueden situar en regiones donde la señal del satélite no se encuentre disponible [15].

Por otra parte, en México se ha llegado a la conclusión que los incendios forestales no necesariamente afectan a la biodiversidad, sino que contribuyen a la misma en ciertos ecosistemas, como los bosques de pino-encino de la región, ya que toman en consideración la magnitud y la provocación del mismo [16]. Se lo considera un desastre solo cuando afecta el interés económico y social del bosque, en consecuencia, las autoridades pertinentes promueven políticas de educación y capacitación a zonas rurales sobre el uso responsable del fuego [16], dejando en segundo plano a un lado la investigación sobre de sistemas de prevención y detección.

En Catalunya-España, como estrategia para el control de los incendios forestales, han decidido anticiparse a ellos mediante el estudio del comportamiento del fuego usando herramientas informáticas. Hacen un recorrido histórico de incendios ya ocurridos y con esta información determinan el patrón de incendios futuros en una región, hallando puntos críticos [17].

En otras ciudades de España como en Aragón, Navarra, Valencia, y Castilla de la Mancha, se ha llegado a la conclusión de que la causa de la mayoría de los incendios forestales en el país es de origen antrópico, es decir, por el hombre; de hecho, la causa puede variar según la región, por lo que es

necesario el diseño de la prevención basándose en la problemática específica de la localidad [18].

En España se expone un sistema de detección de incendios forestales utilizando una red WSN. En el modelo se manejan sensores como: temperatura, humedad, luz infrarroja y luz visible. Del mismo modo, la energía es suministrada por paneles solares a cada nodo sensor. Esta red tiene como objetivo realizar detecciones tanto de día como de noche. Sin embargo, se presentaron dificultades al momento de identificar incendios. A pesar que no se da detalles de las pruebas realizadas experimentalmente, se ha mención a cuatro tipos de escenarios: Nodos a distancias de 10cm, 20cm, 30cm del fuego respectivamente y de un nodo "normal", el cual no tiene presencia de fuego a su alrededor [19].

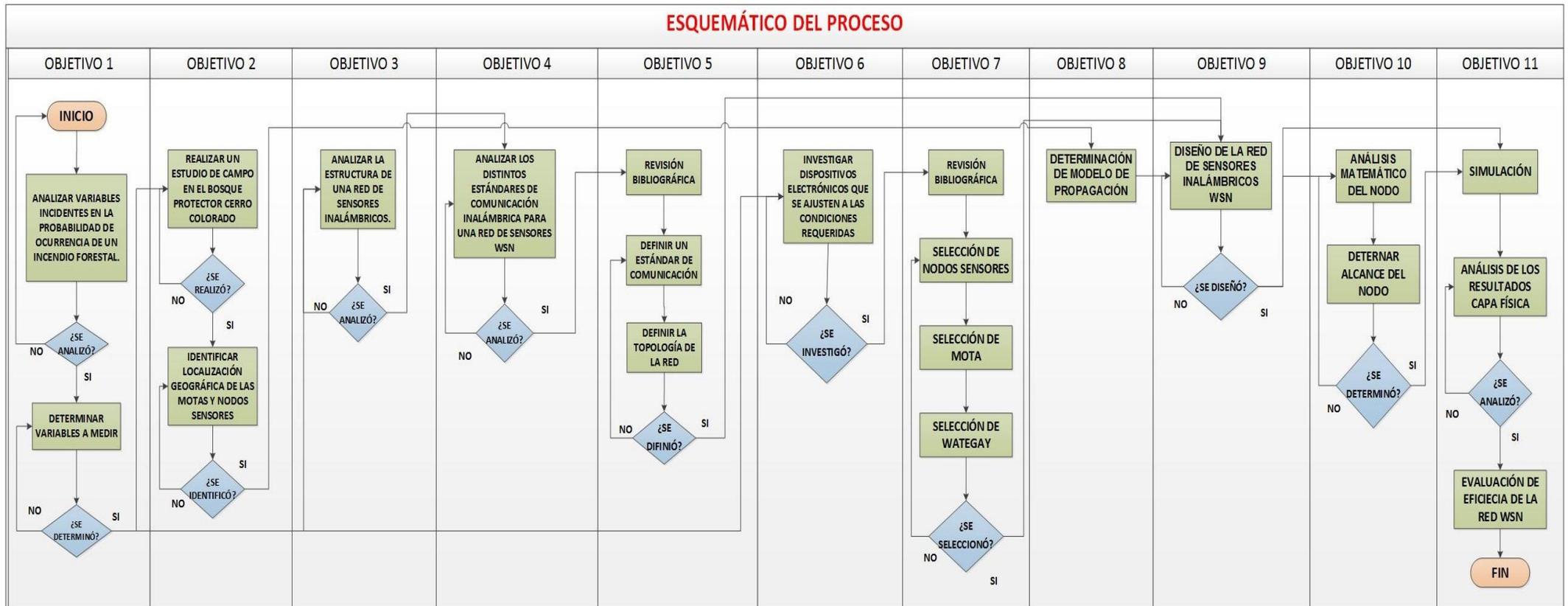


Figura 1.1 Diagrama de proceso de la metodología

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

A medida que ha pasado el tiempo, el desarrollo tecnológico ha ido en constante crecimiento y evolución, agilizando los procesos tecnológicos y dando paso a dispositivos que procesan la información de manera ágil y precisa. Día a día la sociedad y la industria se ven inmersas en diversos problemas, los cual son solucionados con dispositivos tecnológicos cada vez más avanzados. Las telecomunicaciones tienen un papel preponderante en el presente desarrollo, por ende, no se ve ha visto aislada a tales problemas, ya que cada vez y cuando la demanda que surge a partir del mejor manejo de transferencia de información es mayor; consecuentemente, hoy en día la tasa de transferencia de información o paquetes es mejor sectorizada y estudiada.

El capítulo 2 tiene como objeto analizar, diferenciar, evaluar e investigar diversos dispositivos electrónicos de la solución tecnológica propuesta en el capítulo 3 respecto a prevenir la propagación de incendios forestales en el Bosque Protector Cerro El Colorado. También, se incluirá información respecto a los incendios forestales, su propagación y las variables que comúnmente se miden para modelar su crecimiento o avance. Se investigará y especificará la tecnología a utilizar, con su respectivo estándar, para proceder, en los capítulos posteriores a la elección de los dispositivos que sean aptos para el diseño de la red WSN para la Prevención de la Propagación de un Incendio Forestal en el escenario antes mencionado.

Hoy en día, en el área de las telecomunicaciones, tiene vital importancia el uso de redes de sensores inalámbricos o más conocidas por sus siglas en inglés como WSN, las mismas que ha resuelto inconvenientes respecto al intercambio eficiente de información (paquetes) de manera inalámbrica, lo cual ha ayudado a solucionar nuevas necesidades. Principalmente las WSN se usan para el manejo de sensores, los cuales serán escogidos según las variables a monitorear, cabe recalcar que estas redes son implementadas bajo la tecnología Zigbee (que se

detalla en este capítulo), la misma que utiliza el estándar IEEE 802.15.4, lo cual ha ayudado a dar soluciones en diferentes áreas, con un gasto de energía mínimo. A continuación, se ampliarán los temas que se ven involucrados para obtener los objetivos de la investigación.

2.1 Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)

Una red de sensores inalámbricos o más conocida por sus sigla en inglés como WSN (Wireless Sensor Networks) está constituida por “n” número de dispositivos llamados nodos sensores, los cuales trabajan en conjunto compartiendo y almacenando información en torno a un determinado fenómeno para ser vigilado por medio de un protocolo de comunicación inalámbrica que les da la facultad de formar redes *ad-hoc* [19], esto quiere decir que pueden funcionar sin una administración principal e infraestructura.

Las WSN se implementaron, por la necesidad de cubrir superficies donde tecnologías inalámbricas como Bluetooth, Wimax y Wifi eran innecesarias y a la vez muy costosas respecto a la implementación, lo cual generaba alto desperdicio de recursos.

Por lo general, las WSN se encuentran estructuras por muchos nodos, los cuales se dispersan en distintos lugares dentro del área a cubrir. Dichos nodos tienen como beneficio su bajo consumo de energía y costo de implementación, su principal tarea es adquirir datos del entorno donde se encuentran, datos que se definen por medio de las variables a monitorear. Los datos son obtenidos de sensores como temperatura, presión, humedad, gases, vibración y distintos estados ambientales.

Cabe recalcar, que los nodos de esta red son independientes, por ende, se centran en adquirir los datos mediante los sensores, después un módulo de procesamiento es el encargado de administrar los datos (paquetes) y por último enviar los datos a un nodo receptor o estación base. La alimentación de los mismos es independiente, generalmente se lo hace por baterías y en

ocasiones por paneles solares, lo cual es de gran ayuda al momento de su implementación en lugares donde no existe alumbrado eléctrico. En la Figura 2.1 se muestra una red WSN.

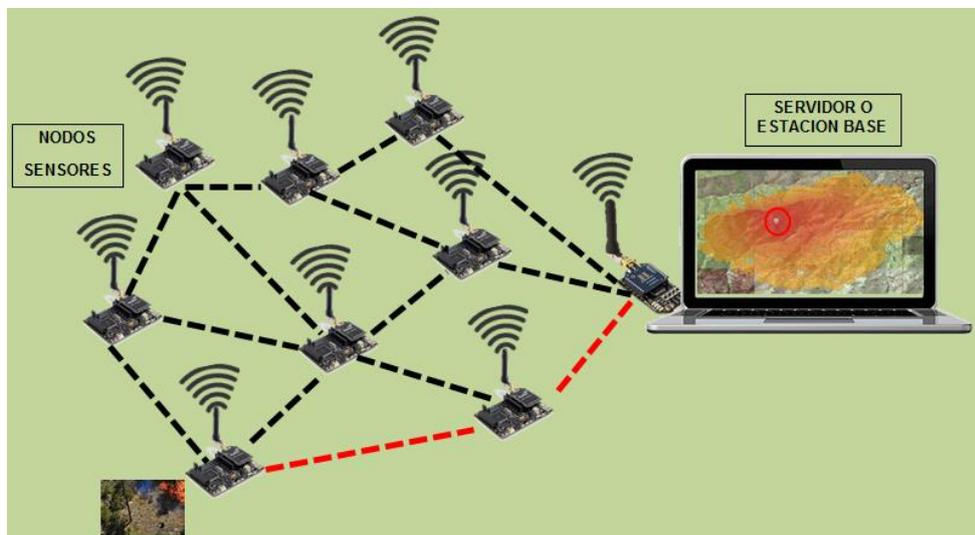


Figura 2.1 Red WSN

2.1.1 Características de una WSN

Las WSN forman parte de las redes de área personal de bajo nivel de tráfico LR-WPAN [20] por sus siglas en inglés, puesto que, al inicio estas redes consisten en la transferencia de datos (paquetes) en espacios geográficos pequeños, en la actualidad ha ido mejorándolo llegando a tener cobertura para grandes extensiones, lo cual va de la mano con el avance tecnológico de Zigbee, con la cual se crean y operan estas redes. Seguidamente se detallarán características por la cuales este tipo de redes se implementan con mayor frecuencia en lugares donde la tasa de transmisión es considerablemente baja, cobertura eficiente y consumo de energía mínimo, lo cual se traduce en bajos costos al instante de su instalación.

- **Gran cantidad de nodos:**

A causa la facilidad respecto al diseño que tienen las WSN, la cantidad máxima de nodos que se pueden colocar es de 65000, los cuales pueden trabajar a una velocidad de hasta 250kbps [21], cubriendo grandes distancias, brindando una cobertura eficiente para toda red con un ancho de banda mínimo requerido.

- **Comunicación ad-hoc:**

Esta es una de sus mayores ventajas, ya que al tener una conexión descentralizada (ad-hoc) [22] la red no es dependiente únicamente de un nodo para la transferencia de datos, teniendo total autonomía respecto al tráfico, es decir, cada nodo está interaccionando con otro y es el responsable de guiar el tráfico hacia los demás.

- **Mínimo Empleo de Energía:**

Esta característica por defecto en cada nodo y es una de las más destacadas, ya que alarga la vida útil de los componentes electrónicos de la red. Los nodos de una WSN únicamente están activos (on) al momento en que se encuentran obteniendo y transmitiendo datos, por lo cual, cuando esto no ocurre los nodos estarían en un estado de consumo mínimo de energía (sleep), como se puede observar en la Figura 2.2. Esto ha generado que este tipo de redes sean ideales en lugares la energía eléctrica es escasa. La alimentación de energía eléctrica puede darse de dos modos: Por baterías o paneles solares.

- **Topología de una WSN:**

En una red WSN la topología depende de cómo estén programados los nodos sensores respecto al envío y enrutamiento de datos, esto está ligado de forma directa con la cobertura de la misma. Entre las principales topologías se encuentran la estrella, árbol y malla, como se muestra en la Figura 2.3. Cabe recalcar, que la topología malla es la

más usada y que en la implementación se pueden combinar los diferentes tipos, dando paso a lo que se conoce como topología híbrida

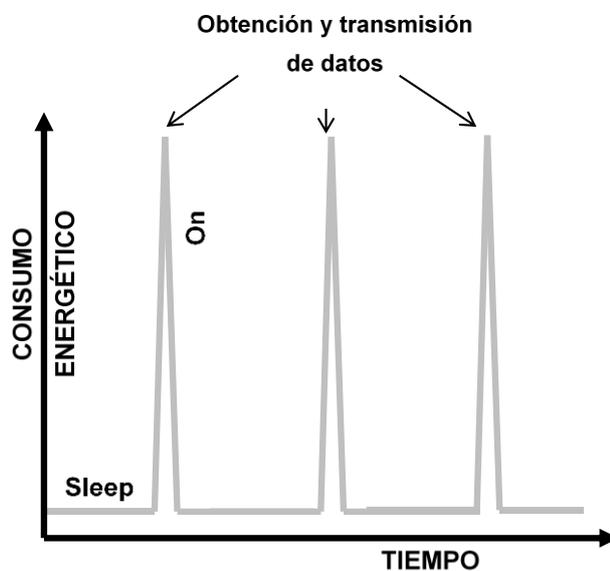


Figura 2.2 Consumo energético de un nodo en una WSN

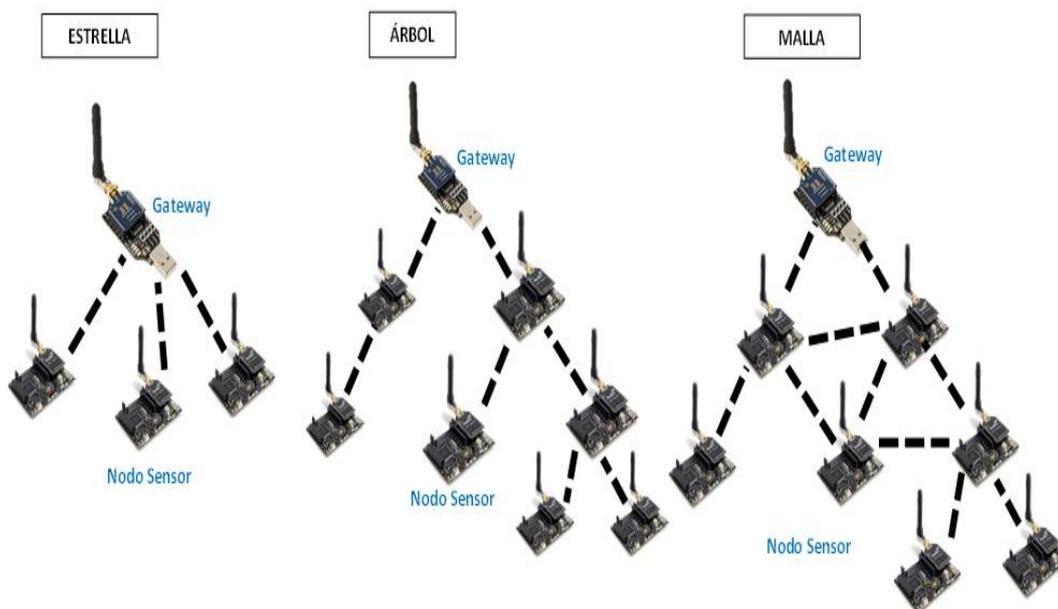


Figura 2.3 Topologías en una WSN

- **Implementación:**

En comparación respecto a otras tecnologías como Wifi o Bluetooth, el costo de implementación de un WSN es relativamente bajo, ya que el hardware a utilizar tanto en la estación como para los nodos es muy sencillo y de fácil manejo. Esto se da porque la tasa de transmisión de datos es considerablemente baja, la cual se realiza en intervalos de tiempo determinados, sin necesitar mayor capacidad de procesamiento de los elementos a utilizar.

2.1.2 Elementos de una WSN

En una WSN está conformada por distintos elementos, que en su conjunto logran cumplir con todas las características antes mencionadas. A continuación, se mencionan los elementos que forman parte medular en el funcionamiento de las WSN, como se muestra en la Figura 2.4:

- Nodos Sensores (motas)
- Nodos Coordinadores
- Gateway
- Estación Base o Servidor
- Red Inalámbrica

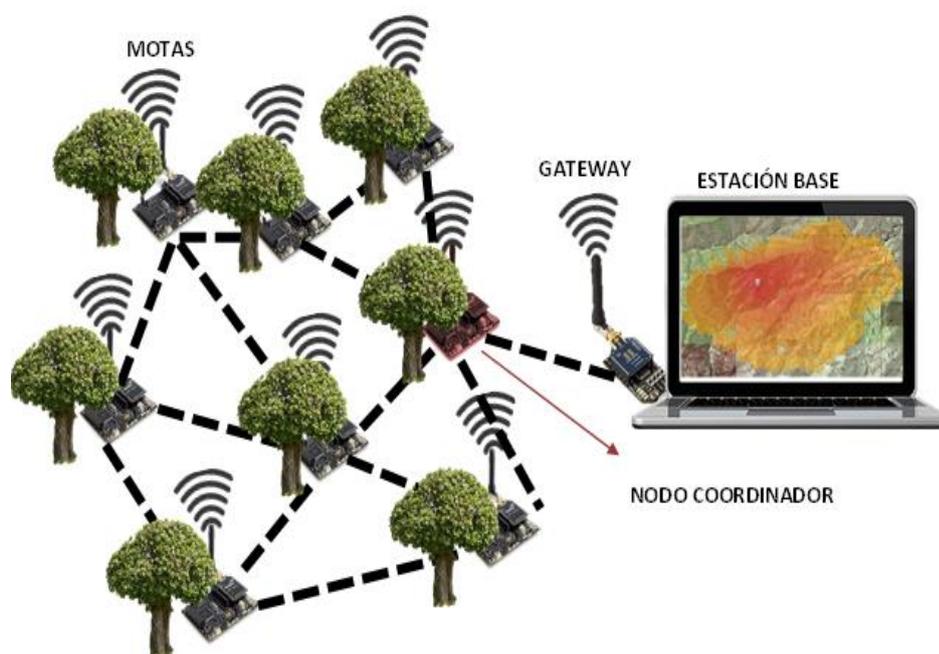


Figura 2.4 Elementos de una WSN

- **Motas**

Estos dispositivos electrónicos reciben ese nombre por el tamaño compacto y peso que poseen. Son los llamados a capturar los datos del medio en donde se implementa la red, por medio de un módulo de sensores, también posee un módulo que procesa los datos y otro que sirve para la comunicación inalámbrica. Cada mota se alimenta de una fuente de manera independiente. Al instante de elegir una mota del mercado o diseñar una se debe de tener en cuenta su tamaño, costo, consumo de energía y compatibilidad respecto a su programación.

Componentes de las Motas

En la Figura 2.5 se describe la composición de una mota o nodo sensor. A continuación, se detalla cada componente de la mota.

Radio y Transceptor: Dispositivo por el cual se envía/recibe información desde/hacia otro nodo sensor dentro del rango en el que pueda transmitir, el encargado de enviar y recibir la información es el transceptor, el cual tiene cuatro estados (emite, recibe, dormido e inactivo)

Batería: Es la encargada de energizar el circuito, preferiblemente debe de ser larga duración. En la actualidad es más frecuente el uso de paneles solares, por su eficiencia al momento de suministrar energía y por durabilidad.

Microcontrolador: Es el cerebro de la mota, el que lleva los procesos provenientes de los sensores, además, ejecuta las instrucciones dadas por el programador.

Convertidor Analógico/Digital: Tiene como función traducir los datos analógicos provenientes de los sensores a digital, para que el microcontrolador puede identificar y procesar la información. Por lo general está dentro del microcontrolador.

Sensores: Los sensores están diseñados para medir o recibir información del medio en donde se encuentran, por ejemplo, presión, humedad, temperatura, luz, etc. Se clasifican en dos grupos: activos (no necesitan una fuente de energía para generar una señal eléctrica) y pasivos (necesitan tener fuente de alimentación) [23].

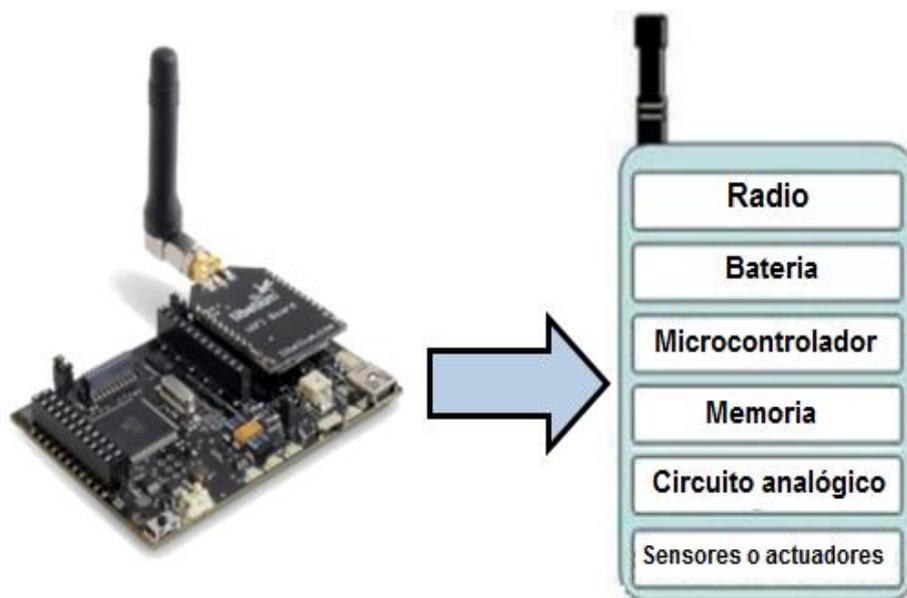


Figura 2.5 Componentes de una mota

A continuación, se describen 3 motas comerciales:

Mica 2

Entre las características más sobresalientes se puede decir que funciona a 4 MHz de frecuencia, tiene una memoria RAM y FLASH (no volátil externa) de 4 y 512 KB respectivamente, con un microcontrolador (Atmel) de 8 bits. Trabaja bajo la tecnología Zigbee (IEEE 802.15.4), su radio de transmisión es de 19.2 Kbps y pueden acoplar módulos de sensores a la placa por medio de unos pines [24].

Intel Mote 2

Estas motas se caracterizan por su capacidad de organizarse de manera autónoma dentro de la red, con un microcontrolador de bajo consumo XScale PXA27x que funciona a baja frecuencia (13 Mhz), con tecnología Zigbee (IEEE 802.15.4) y antena de 2,4Ghz. Posee 4

interfaces (dos para sensores simples y dos para sensores más complejos).

En el módulo principal se encuentran el microcontrolador y el radio. Posee una memoria SRAM igual a 256 KB y 64 MB de memoria disponible. Una de las desventajas es el precio, el cual está alrededor de los mil euros [25].

Waspnote Libelium

Considerada una estructura modular para sensores inalámbricos de código abierto, lo cual facilita la interconectividad con algunas tecnologías como Zigbee, Wifi, Bluetooth, GPRS, 3G, RFID y NFC. Tiene como principal ventaja bajo consumo de energía, posee un reloj de tiempo real con un respaldo de batería, se lo puede programar en el estado de hibernación, lo cual optimiza el rendimiento del equipo, por si se requiere tiene un slot para una MicroSD.

Trabaja a una frecuencia de 14 Mhz, con memoria RAM de 8 KB, FLASH de 128 KB y EEPROM de 4 KB con una tarjeta SD de 2GB. El voltaje de consumo de la placa oscila entre 3.3 y 4.2 voltios, posee cuatro estados, los cuales consumen las siguientes corrientes: On 15mA, sleep 55 uA, Deep sleep 5uA e hibernación 0.06 uA. Es la única mota que trae incluida un conector tanto para baterías como para energía solar, posee una potencia de transmisión 18 dBm con un alcance de 300m, demostrando de esta manera su supremacía ante la competencia [26].

En la Figura 2.5 se puede observar las motas de cada una de las marcas antes mencionadas.

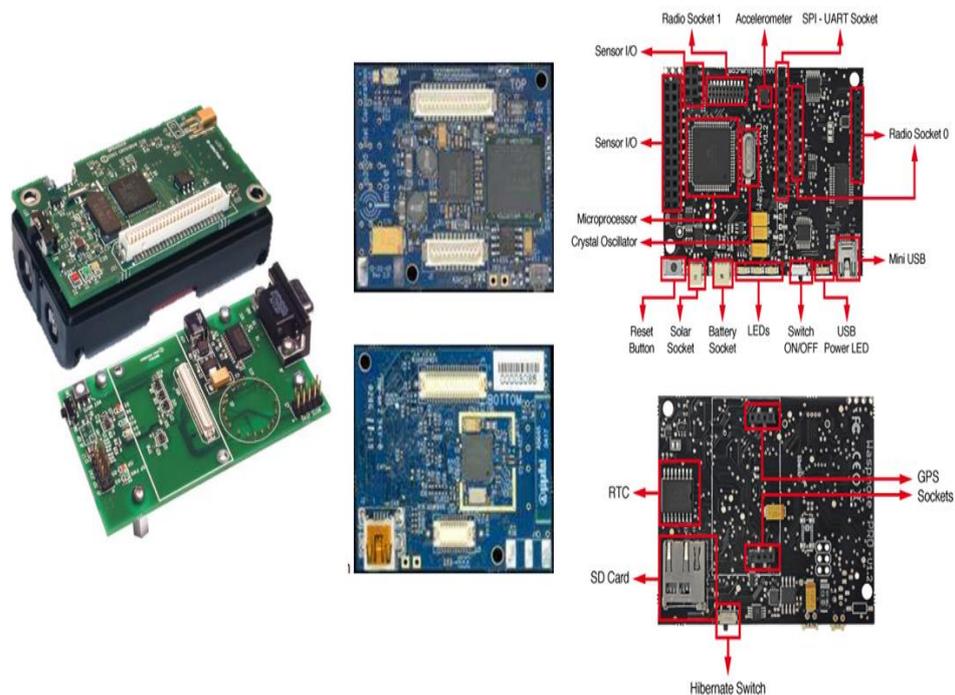


Figura 2.6 Motas Comerciales [24] [25] [26]

En la Tabla 1 se muestra las algunas de las diferencias existentes entre las motas antes mencionadas.

- **Nodo Coordinador**

Este nodo es el responsable de receptor inalámbricamente todos los datos enviados de los nodos sensores que forman parte de la red WSN. Concentra los datos recibidos y los envía a la estación base.

- **Gateway**

Es un dispositivo electrónico que sirve de canal de conexión de la WSN con una red TCP/IP, al mismo tiempo permite que todos los datos reunidos por red sean enviados por la red Ethernet para que a su vez pueda subirse a la nube (internet) por eso recibe el nombre de puerta de enlace.

Mota		MICA2	IMOTE2	WASPMOTE
MCU	Chip	ATmega 128	FXA271	ATmega 128L
	Tipo (bits)	8	32	8
	Memoria Programa (KB)	128	N/A	128
	RAM (KB)	4	32768	8
Almacena miento Externo No Volátil	Chip	AT45DB01 4B	N/A	N/A
	Conexión	SPI	N/A	SPI
	Tamaño (KB)	512	32768	SD hasta 2000
Sistema de Alimentación	Tipo	2xAA	3xAAA	Variable
	Capacidad Típica (mAh)	2850	1100	2000
RF	Chip	CC1000	CC2420	Variable (Xbee)
	Frecuencia	868/916,433 ó 315 MHz	2,4 GHz	2,4 GHz
	Datarate (Kbps)	38,4	250	250
	Potencia de Transmisión (dBm)	5	0	18
	Alcance Exterior (m)	152,4	≈30	300
Año de Comercialización		2002	2007	2009

Tabla 1: Motas Comerciales

Waspnote Gateway

El cual cumple las funciones de un Gateway, antes mencionadas, por medio de un puerto USB conectado al servidor base, que con frecuencia suele ser un computador. Está conformado básicamente de un módulo XBee acoplado por medio de un zócalo XBee parecido al

del Waspnote, un convertidor FTDI que por medio los instaladores adecuados (dependiendo el sistema operativo) realiza la conversión de RS232 a USB y demás componentes como se muestra en detalle en la Tabla 2.

Después de la correcta instalación del dispositivo en mención, puede comunicarse con los XBee de los nodos coordinados (de ser el caso), empezando la interacción y transferencia de datos en la WSN, de la misma forma, se podrán hacer los cambios de acuerdo a las necesidades requeridas

Nombre	Descripción
Leds	
Led de Alimentación USB	Indica que la placa está alimentada mediante el puerto USB
Led RX	Indica que la placa está recibiendo datos a través del módulo Xbee
Led TX	
Led I/O - 5	Se puede configurar como salida digital o como indicador de asociación del Xbee a la red de sensores.
Pulsadores	
Reset	Permite resetear el módulo XBee
I/O - 0	Pulsador conectado al pin I/O 0 del XBee
I/O - 1	Pulsador conectado al pin I/O 1 del XBee
RST - I/O - 6	Pulsador conectado al pin I/O 6 del XBee

Tabla 2: Leds y pulsadores Gateway Libelium [26]

En la Figura 2.7 se puede observar el Gateway de Libelium (A) con el detalle de leds y pulsadores (B).

- **Estación Base o Servidor**

Es donde se recopilan los datos recibidos por la WSN para su procesamiento e interpretación por medio de un simulador, por lo

general, el nodo coordinador y el Gateway se encontrarán juntamente en la estación base, que por lo general suele ser un computador.

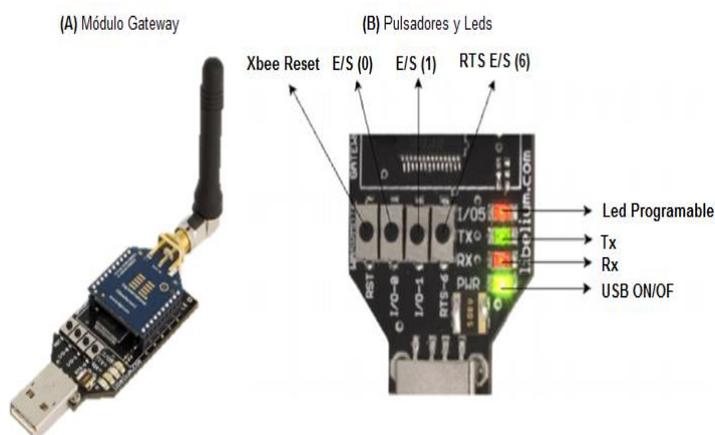


Figura 2.7 Gateway de Libelium [26]

- **Red inalámbrica**

Es el medio por donde se envían y reciben los datos entre nodos y Gateway. La transmisión puede ser por medio óptico (láser e infrarrojo) radiofrecuencia, fibra óptica y radio frecuencia (RF), la cual es más utilizada y recomendada para las aplicaciones que se utilizan en las WSN. La frecuencia de comunicación oscila entre 433 Mhz y 2.4 Ghz bajo un estándar 804.15.4 (Zigbee) [27]

Inmerso en esta tecnología existe gran variedad de propuestas de acuerdo al costo, cobertura y transmisión de datos, en la Tabla 3 se menciona alguna de ellas.

Tecnología	Transferencia (bps)	Cobertura (m)
WiMax	15M	5000
3G	14M	10000
2G	400K	35000
Wi-Fi	54M	50 - 100
Bluetooth	700M	10

Zigbee	250K	40(intteriores) hasta 500 (exteriores)
Zigbee Pro	250K	90(intteriores) hasta 7000 (exteriores)
UWB	400M	5 - 10,
RFID	1-200k	0,01 - 10

Tabla 3: Tecnologías Inalámbricas [27]

2.2 Estándar IEEE 804.15.4

Estándar que se ajusta a los requerimientos de las redes LR-WPAN [20] tanto para la capa física (PHY por sus siglas en inglés) como para la capa de enlace de datos (DLL por sus siglas en inglés); entre las características más sobresalientes se tiene su flexibilidad, bajo precio de implementación y consumo de energía [28]. Hace uso del método de codificación de espectro ensanchado por secuencia directa DSSS (siglas en inglés) el que le da la facilidad de trabajar en bandas de frecuencias libres junto a otras tecnologías. Actúa bajo las modulaciones BPSK y OQPSK (ambas digitales), las cuales funcionan en las bandas ilustradas en la Figura 2.8

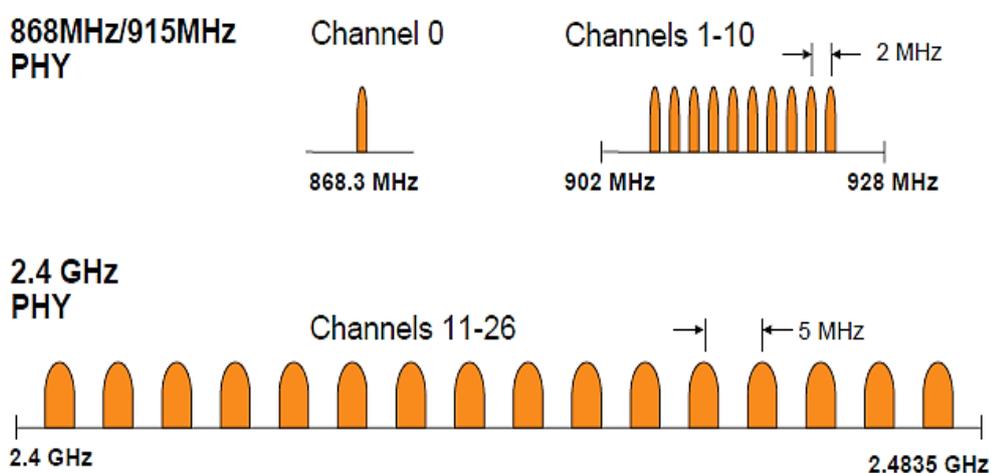


Figura 2.8 Bandas De Funcionamiento del Estándar [28]

A continuación, se especifica en la Tabla 4 las bandas donde puede trabajar, según la capa física, el estándar IEEE 804.15.4

Cabe recalcar que en el año 2006 se añadieron a la publicación las bandas opcionales con sus respectivas especificaciones. Las bandas de 868 y 915 Mhz se utilizan en Europa y América del Norte respectivamente y la banda 2.4Ghz, que cuenta con 16 canales, es la más utilizada a nivel mundial por ser libre (sin costo).

PHY (MHz)	Banda de Frecuencia	Parámetro de Propagación		Parámetro de Propagación		
		Chip Rate (kchips/s)	Modulación	Bit Rate (kb/s)	Symbol Rate (ksímbolos/s)	Symbols
868/915	868 - 868,6	300	BPSK	20	20	Binary
	902 - 928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (Opcional)	868 - 868,6	400	ASK	250	12,5	20-bit PSSS
	902 - 928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (Opcional)	868 - 868,6	400	O - QPSK	100	25	16-ary Ortogonal
	902 - 928	1000	O - QPSK	250	62,5	16-ary Ortogonal
2450	2400 - 2483,5	2000	O - QPSK	250	62,5	16-ary Ortogonal

Tabla 4: Bandas, parámetros de propagación y datos del Estándar [28]

Capa Física (PHY)

Se encarga de adicionar información para a un paquete de datos para su localización y dirección. Consta de una unidad de datos de servicio (PSDU por sus siglas en inglés) que puede llegar a tener como máximo de datos 127 bytes, un preámbulo de 32 bits (sincronización respecto al nivel de símbolo),

utiliza 8 bits para delimitar la inicialización de un paquete (sincronización respecto al nivel de trama), la cabecera está constituida por un campo de 8 bits (representa la longitud de la PHY), como se representa en la Tabla 5 [28].

Respecto a la sensibilidad en la PHY, se puede denotar que el estándar hace mención de hasta -85dBm para la banda de 2,4Ghz y de -92dBm para las bandas que se encuentran entre 868-912 Mhz. El rango deseado dependerá tanto de la sensibilidad del receptor como la potencia del transmisor, el cual deberá tener un valor mínimo de 1 mW de acuerdo al estándar, esto garantiza un alcance de 20 a 30 m [28].

Capa física (PHY)			
Preámbulo (32 bits)	Inicio Delimitador de paquete (8bits)	Cabecera PHY (8bits)	Unida de datos de servicio
SHR		PHR	PSDU
6Bytes=48bits		≤127Bytes	
PPDU			

Tabla 5: Estructura de la PHY

Otra de las características preponderantes del estándar, es la evaluación que hace del canal para determinar cuál es el más indicado para transmitir. Se toma en cuenta la calidad de la señal del canal mediante los siguientes procedimientos:

Detección de energía (DE): Consiste en evaluar, como una señal compatible al estándar, el nivel de energía presente en canal, esto ayuda a obtener una percepción del nivel de información recibida (RSSI por sus siglas en inglés) y poder así concluir si el canal está ocupado o no.

Detección del Canal Libre (DCL): El cual se puede efectuar mediante tres distintos procesos. El primero afirma que el canal no está desocupado según un parámetro de energía dado con anterioridad, este proceso lleva el nombre de nivel suficiente de energía. El segundo confirma si hay señales compatibles a las del estándar y se lo conoce como presencia de la portadora. El tercer y último proceso se llama nivel de energía apto con presencia de portador, consiste en afirmar que el canal no está desocupado siempre y cuando se corrobore que hay señales compatibles al estándar, donde supera el parámetro de energía dado con anterioridad.

Sensado de Portadora (SP): Realiza una demodulación en la señal recibida e identifica si hay compatibilidad con el estándar, cuando el resultado es afirmativo, el canal está ocupado.

Calidad de Enlace (CE): Este procedimiento indica la calidad de información (paquetes) que proporciona el receptor. Trabaja por medio de la relación de ruido de la señal o de su intensidad. Usualmente se lo implementa en una red Zigbee como ruteo.

Capa de Enlace de datos (DLL)

Esta capa se divide en dos “subcapas”, control de acceso al medio (MAC) y control de enlaces lógicos (LLC), esta última está presente en todas las variaciones del estándar 802, a su vez la MAC se ve sujeta al hardware y cambia de acuerdo a la implementación de la PHY del estándar. En la Figura 2.8 se puede observar la estructura del estándar respecto al modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI por sus siglas en inglés) [29].

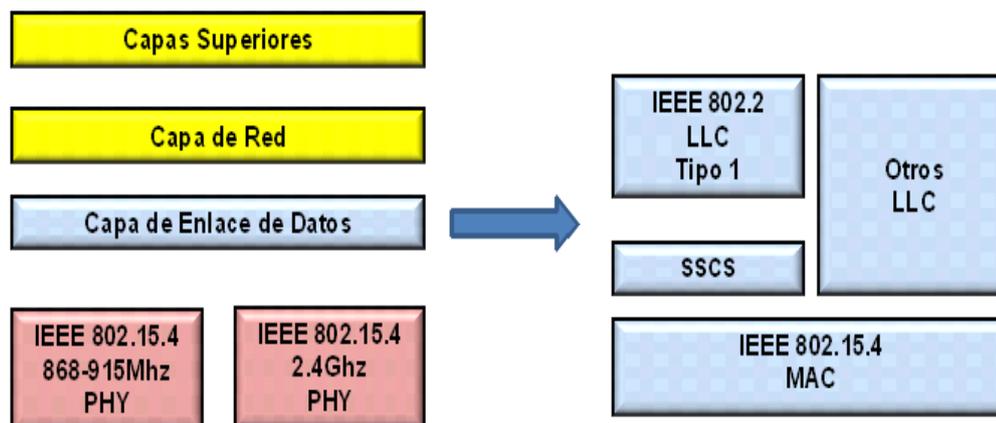


Figura 2.9 Estándar IEEE 802.15.4 bajo el sistema OSI [29]

La MAC sobresale por ser fácilmente asociable con otro tipo de servicio que preste la red, entre sus funciones tenemos la validación de tramas que se envían por el canal, confirmación de paquete recibido (ACK), es vital para que los nodos interactúen, garantiza la ruta de acceso al canal y los tiempos de ranuras (Slot Times) [29].

Cuando se desea transmitir datos, el dispositivo que transmite debe de esperar un tiempo aleatorio llamado backoff, una vez transcurrido este tiempo y si el canal está desocupado, entonces los datos son enviados. Si los nodos desean comunicarse, el estándar lo puede hacer de dos modos:

Modo con Señalización (beacon mode). - Por lo general se lo utiliza en redes con topología de tipo árbol o mesh, donde están presentes gran cantidad nodos. Se base en que el nodo coordinador determina un tiempo para comunicarse con los demás nodos, lo se conoce como ciclo de duración (Polling Time), por lo tanto, cada nodo espera el tiempo que le ordenaron para comunicarse y a continuación deberá cumplir con el protocolo CSMA/CA (protocolo de acceso múltiple a la red múltiple por detección de portadora y prevención de colisiones) [30]. En la Figura 2.9 (a) se puede observar la comunicación del nodo coordinador con un nodo sensor de la red, el ACK

(acknowledge), que se lo utiliza para corroborar la llegada del paquete, caso contrario, se volvería enviar el paquete, mientras esté en el tiempo asignado por el coordinador. A su vez, en la Figura 2.9 (b) se denota la comunicación en el caso que el coordinador tenga datos por enviar.

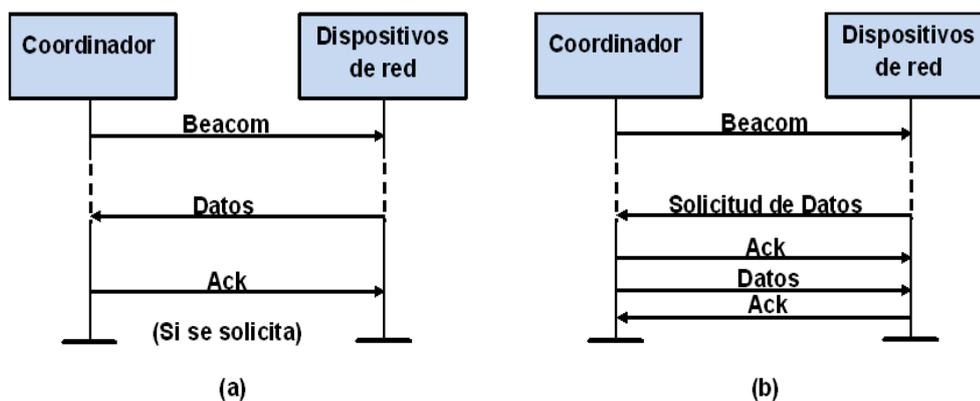


Figura 2.10 Modo Beacom [30]

Modo Libre de Transmisión (non-beacon mode): Implementado generalmente, en redes punto a punto, donde la cantidad de nodos es mínima, consiste en que cada nodo puede transferir, como máximo, tres veces un paquete de datos en el momento que desee al coordinador, lo se confirma con un ACK (como se muestra en la Figura 2.10 (a)). Por el contrario, si el coordinador transmite, debe de esperar a que el nodo sensor le envíe una data request (datos solicitados), para que posteriormente el coordinador envía un ACK y después los datos, como se muestra en la Figura 2.10 (b). Todo esto se da siempre y cuando se cumpla con los requerimientos del protocolo CSMA/CA [30].

Respecto a la funcionalidad de los dispositivos electrónicos, basándose en el estándar IEEE 802.15.4, existen dos tipos:

Dispositivos de funcionalidad completa (FFD por sus siglas en inglés) o Nodos activos, los cuales se pueden comunicar entre ellos y con otros dispositivos de funcionalidad reducida (RFD).

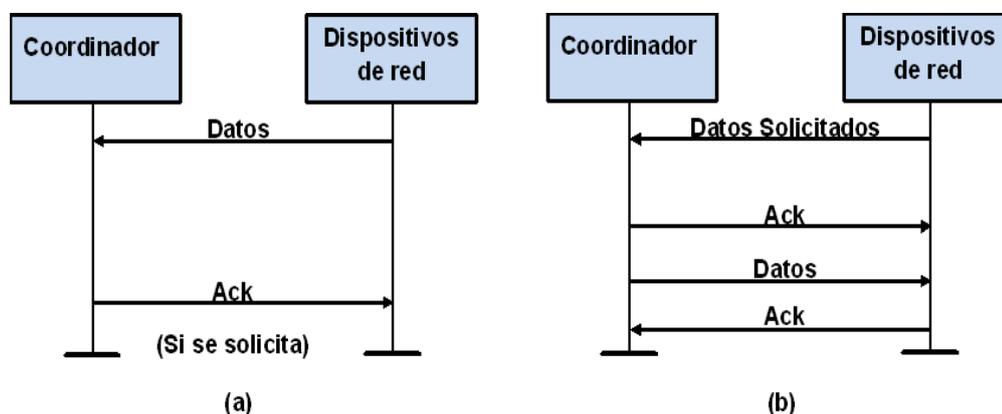


Figura 2.11 Modo Libre de Transmisión

Dispositivos de funcionalidad reducida (RFD por sus siglas en inglés) o Nodos Pasivos, generalmente utilizados para aplicaciones muy básicas, se pueden comunicar sólo entre ellos en periodo determinado de tiempo, el tamaño del paquete de datos enviado por este tipo de dispositivos es pequeño (mayores a 128 Bytes. Por ende, en su implementación se requiere de recursos mínimos respecto al hardware).

2.3 Tecnología Zigbee

Nombre que se le da por la comparación a un panal de abejas por el hecho de ser un conjunto de dispositivos que trabajan unidos para realizar una o varias tareas complicadas [31]. Zigbee está implementada después de la capa enlace de datos del protocolo IEEE 802.15.4, como se muestra en la Figura 2.11.

Se caracteriza por tener mínimo consumo energético y de implementación para de sensores y actuadores. Es el puente entre la MAC y la capa de Aplicación (APL, por sus siglas en inglés). Organiza y provee el enrutamiento dentro de una red multisalto, configura dispositivos nuevos y es la encargada

de dar la seguridad a la red. La tecnología Zigbee soporta topologías tipo árbol, estrella y malla (mencionadas anteriormente) [32].

Un aspecto de suma importancia es el de la seguridad al momento de transmitir, Zigbee utiliza 4 servicios de seguridad iguales a los que utiliza la MAC en el estándar IEEE 802.15.4 que son:

Aplicación - Perfil	Usuario
Soporte de Aplicación	Zigbee
Red - Seguridad (SSP)	
MAC	IEEE 802.15.4
PHY	

Figura 2.12 Arquitectura de la tecnología Zigbee [32]

Revisión de Ingreso: donde el módulo tiene una lista de dispositivos "acreditados" de la red.

Series de Refresco: Se trata de tramas con un valor específico el cual es comprobado por el controlador para asegurarse que las tramas no están cambiadas o sustituidas.

Encriptación de Datos: Se lo realiza por medio de una codificación de 128 bits.

Unificación de Tramas: Para que la información no pueda ser cambiada por otra persona [31].

Elementos que conforman una red Zigbee

Se los clasificó según la función que realizan dentro de la red, como se puede observar en la Tabla 6

Direccionamiento

Se lo realiza por medio de un módulo Xbee con solo una dirección de 64bits (única), esto ayuda a incrementar la robustez del estándar [33]. Sin embargo, se debe hacer hincapié que la dirección de red es única y de 16 bits, la cual es dada por el Coordinador cuando un nodo pertenece a la red. El tener cada nodo una sola dirección de red, le permite ser fácilmente ser identificado, el inconveniente que se podría dar es en el caso que el nodo esté o caiga en un lugar fuera de la cobertura ya que existe la posibilidad que pierda su dirección, por ende, se debe de mantener las direcciones extendidas y guías de la red.

Dispositivo	Características
Coordinador	<ul style="list-style-type: none"> • Solo puede existir uno por red • Inicia la información de la red. • Es el coordinador de la PAN.
Router	<ul style="list-style-type: none"> • Se asocia con el coordinador de la red o con otro router ZigBee • Puede actuar como coordinador • Es el encargado del enrutamiento de saltos múltiples de los mensajes
Dispositivo Final	<ul style="list-style-type: none"> • Elemento básico de la red • No realiza tareas de enrutamiento

Tabla 6: Elementos de una red Zigbee [31]

Aplicaciones

Entre las conocidas aplicaciones que se ajustan a las características de la tecnología Zigbee está el área de domótica, las redes de sensores para medir temperatura, luz, agua que se muestra en la Figura 2.12.

2.4 Módulos Xbee

Estos módulos son elaborados por la Multinacional Digi International, la cual trabajó bajo el estándar IEEE 802.15.4 con la tecnología Zigbee. A continuación, por medio de la Tabla 12 se detallarán las características más sobresalientes entre los modelos Xbee y Xbee-Pro. El progreso respecto a estos dispositivos se debe básicamente a mejoramiento en las antenas, mejorando su ganancia respecto al gasto energético, estas antenas vienen incorporadas en el módulo y pueden ser de cuatro tipos [35]:

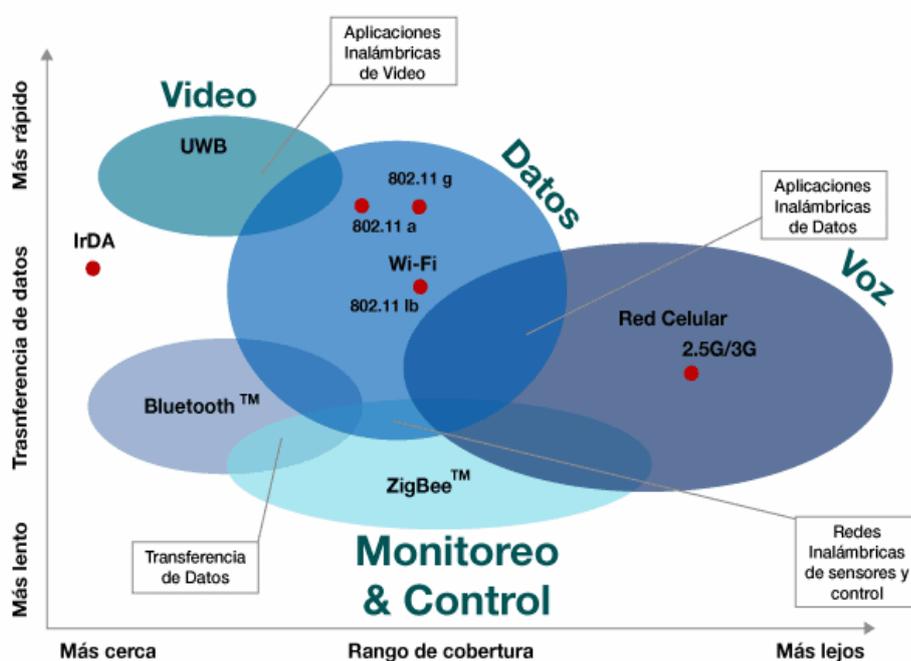


Figura 2.13 Aplicaciones de redes inalámbricas [34]

- RP SMA: Es un conector, el cual, admite conectar antenas de mayor tamaño, disminuyendo las pérdidas provocadas por la conexión al Xbee, también puede darse el caso que venga como un kit y ya esté conectada al módulo Xbee.

- Wire: Es el tipo de antena más frecuente y viene conectada al módulo. Es pequeña, cercana a los 20 cm, con ganancia de 2,1 dBi.
- UFL: Parecida al tipo RPSMA respecto al acoplamiento de una antena, con la diferencia que existe una ganancia máxima de 9.5dBi.
- Chip: NO es necesario tener cableado el módulo a los extremos, ya que viene lista para su funcionamiento.

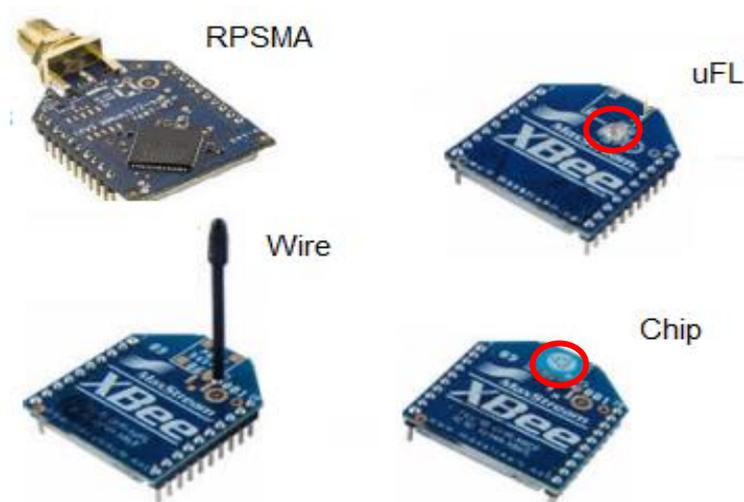


Figura 2.14 Antenas Xbee

A continuación, en la Tabla 7 se denotan las diferencias que entre el módulo Xbee y el Xbee-Pro, desde velocidad hasta los indicadores de canales.

ESPECIFICACIONES	XBEE	XBEE - PRO
RENDIMIENTO		
Velocidad de datos en RF	250kps	
Alcance en interiores/zonas urbanas [m]	40	90
Alcance en línea de visión / exteriores [m]	120-500	1.6k-7k
Potencia de transmisión [mW]	1.5 a 1dBm - 2 a 3dBm	50 a 17dBm
Sensibilidad de recepción [dBm]	-96	-102

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS		
Rango de alimentación	2,1 – 3,6 VCC	3 – 3,4 VCC
Corriente en transmisión	35 / 45 mA, 3,3VCC	295 mA, 3,3VCC
Corriente en recepción	38 / 40 mA, 3,3VCC	45 mA, 3,3 VCC
Corriente en bajo consumo	<1uF, 25°C	<10uF, 25°C
INFORMACIÓN GENERAL		
Frecuencia	2.4 GHz	
Entradas analógicas	4 canales A/D de 10 bits	
Entradas/Salidas digitales	10	
RED Y SEGURIDAD		
Encriptación	AES 128bits	
Entrega confiable de paquetes	Reenvíos / Reconocimientos	
Identificadores y canales	PAN ID, 64 bits IEEE MAC, 16 canales	PAN ID, 64bits IEEE MAC, 13 canales

Tabla 7: Características de los módulos Xbee y Xbee Pro [36]

Tipos de conexiones

- Punto a punto

En primer lugar, se configura la dirección utilizando los comandos MY y DL. El comando MY arbitrariamente define una dirección para el módulo para poder interactuar con un DL que tenga una dirección, que también es dada de manera arbitraria [13].

- Punto – Multipunto

Transmite datos desde su posición a uno o varios dispositivos que están dentro de la red, este proceso hace que se obtenga más control sobre la red ya que se necesita de distintas direcciones de otros dispositivos, por ende, la seguridad incrementa. A parte del comando MY y ID, para este caso se requiere de dos comandos adicionales, el primero se llama ID y es aquel que me indica si los módulos pertenecen a la red ID (proviene de la red de área

personal PAN). El segundo se llama ATID, sirve para configurar el valor que va a tener ID y tiene un rango de 0x0 hasta 0xFFFF [31].

2.5 Modelos de Propagación

A pesar de existir una gran variedad de modelos de propagación, el estudio se basa netamente en tres modelos empíricos utilizados en zonas boscosas, donde factores como la cantidad de árboles, la geografía del terreno, pérdidas a causa de obstáculos y difracción son causales de que la señal se vaya atenuando.

- Weissberger

Llamado también como Modelo de decaimiento exponencial modificado [37], es ideal para recorridos (señal) donde existe la presencia de árboles como obstáculo y se lo aplica donde la probabilidad de que la difracción de la sea en el interior de los árboles, más no en la copa. Viene dada por las fórmulas 2.1 y 2.2, dependiendo del escenario a analizar.

$$L_W(db) = 1.33f^{-0.2842}x^{0.588} \quad \text{para} \quad 14m < x \leq 400m \quad (2.1)$$

$$L_W(db) = 0.45f^{-0.2842}x^{0.26} \quad \text{para} \quad 0m < x \leq 14m \quad (2.2)$$

Donde: L_W es la pérdida a causa de la vegetación del bosque, viene dada en [db], f es la frecuencia en [Ghz] y x es la distancia que existe entre el transmisor y receptor. Existe un parámetro que viene dado y es el de pérdidas por la densidad de las hojas (follaje), el cual oscila entre 3 a 5 [db] en el caso de existir, cuando los árboles quedan sin hojas, este parámetro es igual a cero [37].

- ITU

Implementado a causa de experimentación en la banda UHF (Ultra High Frequency), la cual trabaja en una frecuencia que se encuentra entre 300Mhz a 3Ghz. Fue propuesto en el caso exclusivo cuando la separación del enlace

entre el transmisor y receptor esté por debajo de los 400 metros [38], de este modo, se garantiza que la señal (en su mayoría) se propague en medio de los árboles, con la limitación de que sean árboles pequeños. Viene expresada por la ecuación 2.3.

$$L_{ITU} - R(\text{db}) = 0.2f^{0.3}x^{0.2} \quad (2.3)$$

Donde: L_{ITU} es la pérdida en [db], está directamente relacionada con la frecuencia (f) en [Mhz] y x que es la distancia en [m].

- Multipath fading

Este modelo surge bajo los efectos del sombreado (pérdida por absorción, difracción, reflexión y dispersión) también es conocido como desvanecimiento lento (slow fading). Trabaja definiendo la frecuencia, viene expresada por la ecuación 2.4.

$$L_{multipath} = -(10\gamma \log(d) + L_{freeSpace}[1\text{metro}] + L_{absorcion} \quad (2.4)$$

Dónde: γ es el exponente de pérdida por dispersión y $L_{absorcion}$ es la atenuación de la señal al pasar por paredes, arboles, etc

Las pérdidas en el espacio libre vienen dadas por por la ecuación 2.5:

$$L_{freeSpace}(\text{dB}) = -(20 \log(d) + 20 \log(f) - 27.5) \quad (2.5)$$

El exponente de pérdidas por dispersión y las perdidas por absorción vienen dadas por la Tabla 8, según la aplicación que se vaya a efectuar o escenario donde se vaya a implementar.

Aplicación para Exteriores	Exponente de Dispersión	Pérdidas por Absorción (dB)
Espacio libre	2	0
Presencia de árboles	3 a 4	10 a 20
Edificios	4	0

Tabla 8: Especificaciones de pérdidas en función de la aplicación [36]

2.6 Incendios Forestales

Un incendio forestal es considerado un fuego, independientemente su origen, causa daños irreversibles, en ocasiones irreparables para la sociedad y el medio ambiente. Crece desmesuradamente en zonas rural, por medio cualquier tipo de vegetación [40], quemando todo al paso, como ganado, casas, haciendas, terrenos enteros de siembra e inclusive personas.

2.6.1 El Fuego

Definido como un efecto químico que desprende luz y calor, en el cual se mezclan agentes reductores (combustibles) y oxidantes (comburentes) donde se encuentra presente el calor, como se muestra en la Figura 2.15.



Figura 2.15 Triángulo de fuego [39]

La combustión se da a causa de la formación de gases objeto de la oxidación de combustibles (elemento o sustancia sometida al calor) de sólidos, líquidos o ambos. La llama es parte más notoria y la intensidad

de la misma dependerá de la excitación por la cual esté sometida el o los objetos. [39]

2.6.2 Incendios Forestales

Como se mencionó anteriormente, los incendios forestales son considerados un fuego que se propaga descontroladamente en función del combustible presente.

Cabe recalcar, que la mayor cantidad de los casos donde se presenta un incendio forestal, el agente incidente de forma directa el hombre, independientemente por causa negligencia o imprudencia, por medio prácticas en el sector agrícola, cultura ambiental nula, delitos hasta por disfrute (pirómanos).

Se tiene conocimiento que el carburante forestal tiene gran proporción de agua, la misma que se transforma en vapor uniéndose a los gases presentes en el proceso, sin olvidar lo aceites presentes, los cuales se evaporan muy fácilmente en presencia del calor. En la antesala del incendio el proceso de combustión está inconcluso, es donde se desprende monóxido de carbono (CO) en vez de dióxido de carbono (CO₂), es más, en el periodo de llama, la vegetación no se quema en su totalidad por lo que a pesar que se desprenden grandes cantidades de CO₂, el Co siempre estará presente [41]. En la Figura 2.16 se puede observar un incendio forestal ocurrido en la ciudad de Quito-Ecuador en el 2010, fuente Tc televisión.



Figura 2.16 Incendio forestal

2.6.3 Variables a considerar Previas y durante un incendio forestal

Existen factores preponderantes al momento de empezar y en la evolución de un incendio forestal y a continuación se mencionará, con respecto al origen climático [39].

Temperatura: Al incrementar la temperatura, los materiales combustibles pierden oxígeno e hidrógeno, lo que causa que se sequen, esto ayuda de gran manera a la expansión del fuego alrededor del bosque.

Humedad: A medida que el ambiente se va secando, el suelo y la vegetación van evaporando mayor cantidad de evaporación, secando el material combustible como ramas y hojas, esto ayuda de gran manera a la expansión del fuego alrededor del bosque.

Viento: Es uno de los más preponderantes al momento de la propagación del fuego, es quien le establece la dirección y velocidad.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA RED INALÁMBRICA

En el capítulo 3 se empezará con la descripción del escenario donde se realizó el estudio de campo para determinar las características geográficas y topológicas del escenario. Además, se detallará las especificaciones técnicas, costos, componentes electrónicos y tecnologías a utilizarse en el diseño de la red de sensores inalámbricos.

Previamente se debe de recordar que el diseño de la red pretende alertar la presencia de incendios forestales, para evitar que se propague. Por lo tanto, la red identificará y proporcionará información si existiere un cambio en las variables que se vean afectadas directamente por la aparición de fuego en el medio ambiente. Las variables más relevantes, de acuerdo al análisis realizado en el marco teórico, para el presente diseño son: Temperatura, Monóxido de carbono (CO), Dióxido de carbono y Humedad relativa.

Se debe tener en cuenta, que los nodos sensores estarán ubicados en una zona de gran vegetación, con presencia de animales, condiciones climáticas dependiendo la zona donde irían los nodos sensores, un índice de interferencia considerable por la presencia de árboles y el hombre, el cual podría alterar o robar los dispositivos.

Respecto a la energía de alimentación que debería tener la red, se debe de tomar en cuenta que no se podrá contar con la red de energía eléctrica (alumbrado eléctrico), ya que, por ser un Bosque protegido, el hecho de tener cables alrededor afectaría directamente a la flora y fauna de la zona. Por ende, es necesario tener en cuenta la alimentación energética por medio de baterías, energía solar o energía eólica.

3.1 Descripción del escenario

El escenario corresponderá al Bosque Protector Cerro Colorado, sector que cuenta con una extensión aproximadamente de 325,43 hectáreas divididas en dos bloques según el acuerdo ministerial 128 por parte del Ministerio del Ambiente [49].

Este Bosque, se caracteriza por tener una topografía irregular y consta de planicies aledañas al río Daule; sus suelos se caracterizan por presentar una textura limo arenosa. Los niveles de erosión fluctúan entre moderada a localizada en sitios puntuales. Existen urbanizaciones populares aledañas a este como lo son: Orquídeas, Los vergeles y Mucho Lote por lo que es considerado un sector suburbano. Además, tiene una vegetación que es de gran importancia para evitar inundaciones, producto de precipitaciones pluviales en estos sectores.

El área total del bosque es dividida en dos bloques debido a la construcción de la autopista Terminal Terrestre – Pascuales como se muestra en la Figura 3.1. El bloque 1 tiene como área 3.104 km², mientras que el bloque 2 tiene como área 0.214 km².

De acuerdo al estudio de campo realizado, se resolvió diseñar la red WSN solo en el bloque uno, debido a que el bloque dos no presenta el combustible necesario para ocasionar un incendio forestal.

La forma del escenario es un factor no relevante al momento de diseñar y simular la red, ya que se puede encerrar el área total que se desea cubrir con un polígono regular para asegurar que ninguna coordenada del área quede sin cobertura. Para el escenario descrito se ha decidido utilizar un rectángulo con un área de 5.628 km², aproximadamente 2 km² más que el área original del bosque. Este aumento de área es para efectos de la simulación de la red, más no para definir el número y la ubicación de las motas.



Figura 3.1 Área de cada bloque del Bosque Protector Cerro Colorado

3.2 Diagrama de Bloques de la WSN

A priori se estudió la estructura que implica el diseño de una WSN, por lo que antes de diseñar la red como tal, se realizará un esquema gráfico de los dispositivos que se necesitan para conseguir dicha estructura tal como se muestra en la Figura 3.2 del cual se puede detallar lo siguiente:

Los nodos sensores estarán encargados de monitorear las variables que influyen en la probabilidad de que ocurra un incendio forestal. Están compuestos por los sensores necesarios para medir dichas variables, un microcontrolador y un módulo transmisor/receptor inalámbrico para interconectividad. Para el escenario descrito son necesarios algunos nodos sensores.

La estación base estará encargada de la seguridad del Gateway y el servidor. Además, el Gateway estará encargado de subir toda la información relevante a la nube enviada por el nodo Coordinador.

En la Figura 3.3 se observa el diagrama de bloques de la red, en donde se puede ver que la entrada del sistema son las variables que se desean medir, las cuales serán monitoreadas por el nodo sensor. Este tendrá la tarea de supervisar que cada una de las variables no pasen de su umbral, el cual ha sido analizado y definido en el capítulo anterior.

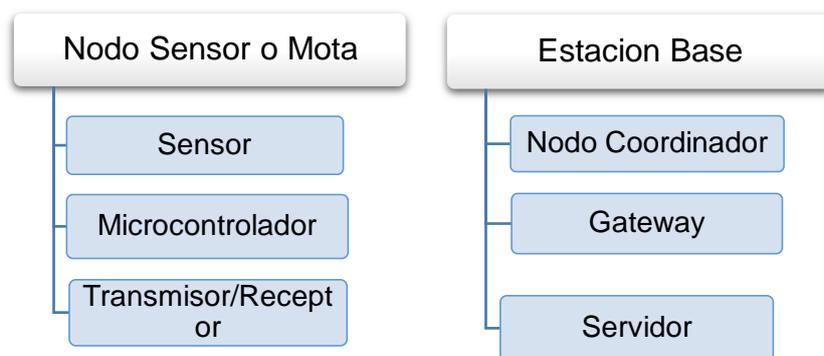


Figura 3.2 Estructura de la WSN [27]

Si una de ellas llegase a pasar dicho umbral, el nodo sensor transmitirá al nodo coordinador un mensaje alertando de dicho suceso, luego se transmitirán en tiempo real las mediciones tomadas de todas las variables. El nodo coordinador tendrá como función recibir el mensaje y los datos del nodo sensor y mediante el Gateway subirlos a la nube.

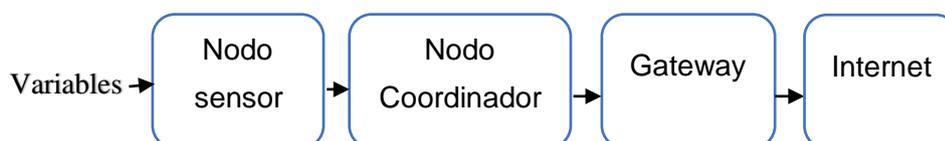


Figura 3.3 Diagrama de bloques de la red

Cabe recalcar que los nodos sensores serán controlados remotamente por el nodo coordinador y se comunicarán con el mismo de una manera directa

o indirecta dependiendo de la topología de la red tal como se muestra en la Figura 3.4. Se usará la misma tecnología para cada mota para no realizar el análisis de compatibilidad que se requiere al usar tecnologías diferentes.

Previo a la elección de los dispositivos electrónicos que se usarán para diseñar la red, se necesita definir el estándar de comunicación para los enlaces entre los nodos sensores y el nodo coordinador, y para el enlace entre el nodo coordinador y el Gateway. Además, la topología de la red es relevante al momento del diseño ya que de esta depende la distribución de los nodos. Con estos dos parámetros se puede asegurar la eficacia de la red en cuanto a la conectividad de la misma.

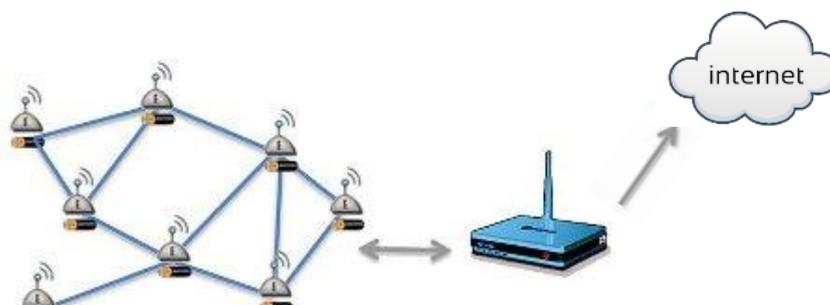


Figura 3.4 Red de sensores inalámbricos [29]

3.3 Elección del Estándar de Comunicación Inalámbrica

En el capítulo anterior se hizo un análisis teórico sobre los diferentes estándares de comunicación inalámbrica más conocidos y usados. Basándose en lo antes dicho, en esta sección se tomará la decisión del estándar a usarse en la red para el enlace de comunicación entre el nodo coordinador y los nodos sensores, la cual se hará considerando las siguientes restricciones:

Transmisión de pequeños paquetes de datos

Capacidad de expansión

Mínimo de complejidad

Monitoreo como aplicación principal

Bajo consumo de energía

Duración de batería

Bajo coste

Fiabilidad

Topología punto -multipunto

El estándar 802.15.4, también conocido como Zigbee, se encuentra dentro de las limitaciones antes mencionadas, por lo que se ha decidido hacer uso del mismo para el diseño de la WSN. Una de las razones del porque no se hace uso del Bluetooth o Wifi es por el alto grado de complejidad y consumo de energía. Además, no permiten que la red sea extensible debido al límite de nodos que se pueden usar, y para sectores con áreas considerables se necesitan redes robustas y flexibles.

Como se supo mencionar en el capítulo anterior, el estándar 802.15.4 trabaja con la tecnología Zigbee en el diseño o implementación de redes WSN y haber concluido que la mejor versión, según los requerimientos antes mencionados, es el módulo de comunicación Xbee-Pro que trabaja a una potencia de transmisión de 63,1mW (18dBm), con antena tipo RPSMA, alcance de 125m (separación entre nodos), frecuencia de 2.4Ghz y velocidad máxima de 250kbps [2] como se puede visualizar en la Figura 3.4.

3.4 Topología

El estándar 802.15.4 permite trabajar con dos tipos de topologías: punto a punto y punto a multipunto. Para definir una topología es necesario tener en cuenta el escenario en donde se quiere realizar el diseño, ya que de él depende la elección del mismo. Además, es ineludible analizar tanto el área de cobertura como el alcance máximo del nodo sensor.

El escenario tiene un área 3.104 km² y presenta mucha vegetación por lo que las pérdidas serán directamente proporcionales a la distancia del enlace

entre los nodos. Los nodos sensores estarán esparcidos estratégicamente en el sector, lo que quiere decir que cada nodo sensor tendrá diferente distancia con el nodo coordinador.

Esta distancia puede que no esté dentro del alcance del nodo sensor por lo que la información puede dar varios saltos hasta llegar al nodo coordinador. A razón de esto se ha decidido que para el diseño de la red se trabajará con la topología punto a multipunto, debido a que hace que la red sea escalable, segura y permite que los mensajes den varios saltos para llegar a su destino como se puede visualizar en la Figura 3.5.

3.5 Selección de elementos de la Red

Dada la explicación en el capítulo 2 acerca de los nodos sensores, nodo coordinador, sus características y funcionamiento, se ha concluido que el Waspote de la empresa española Libelium [3] se ajusta a lo requerimientos tanto en la parte técnica, previamente analizada, como en las consideraciones expuestas al inicio del capítulo 3, sin olvidar, la importancia de la ubicación geográfica de los nodos expuesta en la descripción del escenario.

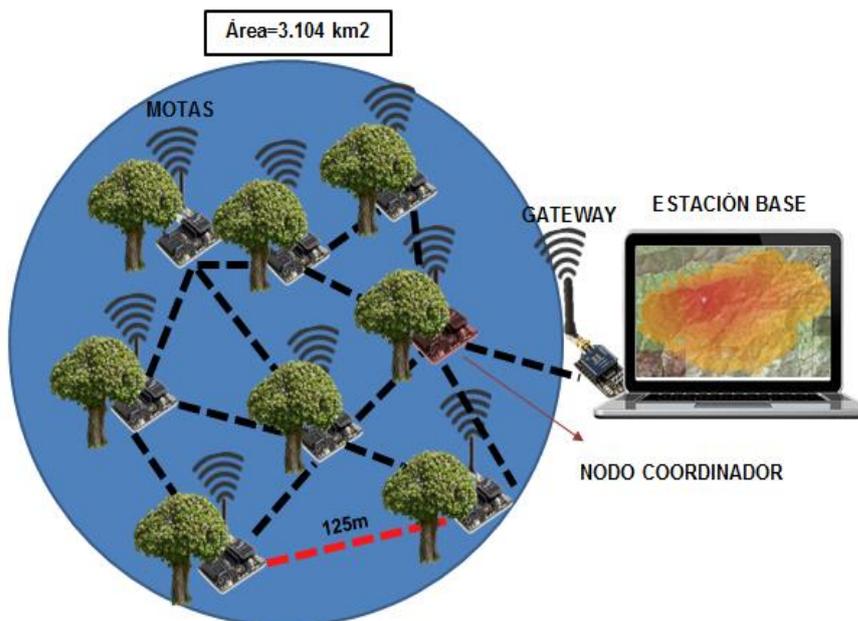


Figura 3.5 Red WSN

3.5.1 Waspnote

Este dispositivo electrónico se volvió realidad después de dos años de investigación por parte de la empresa española Libelium, la cual se encargó de todo el proceso, desde su diseño hasta la fabricación de software y hardware. Una de las características más destacables es el mínimo de consumo energético de los dispositivos que forman parte de la placa (0.7 μA en estado de reposo). También se destaca el incremento respecto a la comunicación entre nodos y la integración de otros sensores [3].

El consumo de energía que tiene el waspmote en su estado de reposo hace que los nodos tengan muchos años de vida útil, sin olvidar que los módulos que integran la placa son de alta sensibilidad, lo cual hace posible que los nodos se comuniquen a grandes distancias [3].

Hardware

Waspote está formada por varios módulos, lo que se conoce como arquitectura modular. Los módulos a utilizar en el diseño se detallan a continuación:

Módulo Zigbee/802.15.4 a 2.4Ghz.

Módulo Sensorial (placa se sensores.

Módulo de alimentación energética (paneles solares).

Componentes y especificaciones técnicas

En la Tabla 9 se hace referencia a las especificaciones técnicas del Waspote y en la figura 3.5 y 3.6 se puede observar los dispositivos principales del Waspote, tanto de cara superior e inferior respectivamente.

Microcontrolador	ATmega1281
Frecuencia	8MHz
SRAM	8KB
EEPROM	4kB
FLASH	128KB, con capacidad de lectura y escritura.
Real Time Clock (RTC)	DS3231SN de Maxim.
Peso	20gr
Dimensiones	73.5 x 51 x 13 mm
Rango de Temperatura	[-20°C, +65°C].
Voltaje de batería	3.3V-4.2V

Tabla 9 Especificaciones Técnicas Waspote [3]

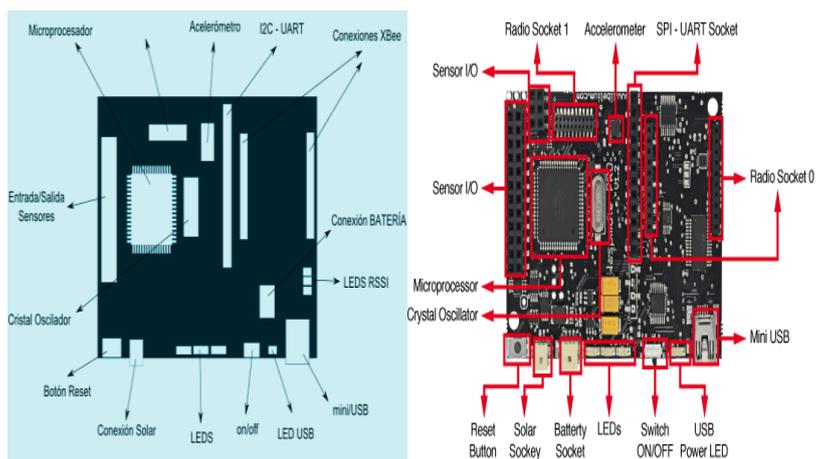


Figura 3.6 Cara superior Wasp mote [3]

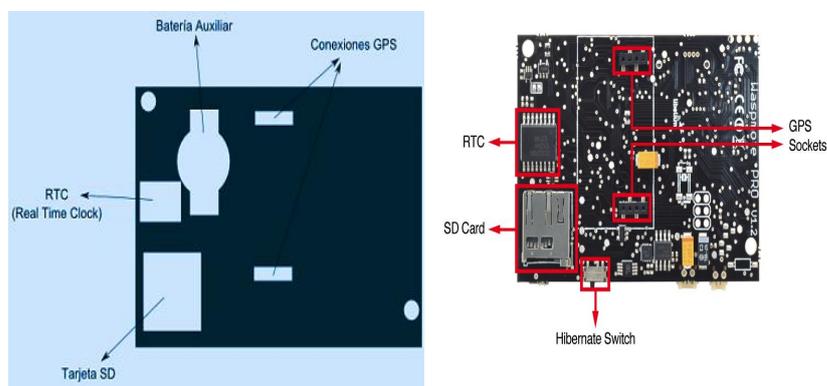


Figura 3.7 Cara inferior Wasp mote [3]

Características eléctricas

En la Tabla 10 se puede observar el consumo de voltaje y corriente del Wasp mote.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Voltaje mínimo de funcionamiento (batería)	3.3V
Voltaje máximo de funcionamiento (batería)	4.2V
Voltaje de carga USB	5 V
Voltaje de carga placa solar	6 a 12V
Corriente de carga de batería por USB	100mA (max)
Corriente de carga de batería por placa sola	280mA (max)

Voltaje máximo en cualquier pin	[-0.5 V, +3.8 V]
Corriente máxima por cualquier pin I/O digital	40 mA
Corriente máxima por cualquier pin I/O digital	40 mA

Tabla 10: Características eléctricas del Waspote [3]

Entradas y salidas

El Waspote se comunica con los diferentes módulos por medio de puertos de entrada y salida que son parte de la placa que posee, como se muestra en la Figura 3.8. Los puertos poseen características muy diferentes que se detallaran a continuación:

Analógicas: Estas entras se encuentran presentes en el terminal destinado para los sensores, las cuales se encuentran enchufadas al microcontrolador de forma directa.

Digitales: Estos pines tiene la característica que pueden estar como entrada o salida, de acuerdo a los requerimientos de la aplicación. Los valores lógicos determinados por Libelium son de 0V para 0 lógico y 3.3V para 1 lógico.

UART: En estos pines, dos de los seis, sirven para que el microcontrolador pueda comunicarse con el Xbee y con el puerto USB.

I2C: Es un bus de comunicación, el cual se conecta en paralelo al indicador de batería descargada.

USB: Utilizada para la interacción entre el pc y la red, ya que por medio del mismo se carga el programa al microcontrolador.

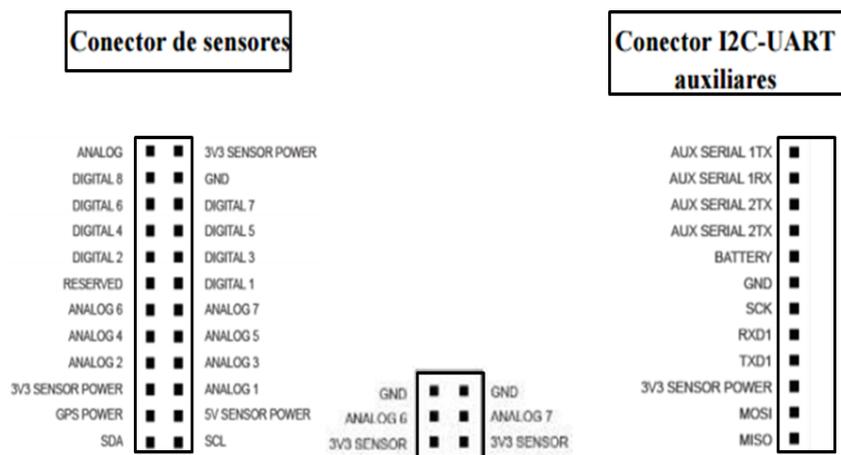


Figura 3.8 Puertos de E/S del Wasmote [3]

Sistema y arquitectura

El diseño del Wasmote se centra en un microcontrolador ATMEGA 1281 de Atmel; el mismo que inicia con el “bootloader” ejecutándose, el mismo que en memoria ejecuta las aplicaciones reunidas y guardadas con anterioridad en la memoria Flash. El objetivo es que se ejecute la aplicación principal o que la primera instrucción se detenga un tiempo de 62ms para sea la primera en ejecutarse, ya que se puede dar el caso de que se esté cargando un nuevo programa, una vez cargado en el microcontrolador, el funcionamiento del Wasmote se deriva únicamente al código, el mismo que tiene dos partes:

Setup: Sólo se ejecuta al iniciar el programa, por ende, es la primera parte del código en ejecutarse. Se recomienda en esta sección incluir la inicialización de los módulos del Wasmote.

Loop: Es un bucle que continuamente se encuentra en ejecución. Para no tener problemas con las acciones del Wasmote, se recomienda utilizar interrupciones.

Modos de funcionamiento

Dado que uno de los objetivos de las motas es estar sin acción humana en cada punto de ubicación transmitiendo paquetes de datos a otro nodo. Para permitir que esto se de en un tiempo prolongado, es de suma importancia la optimización en el consumo de energía.

El Wasp mote, para suplir con estas necesidades presenta distintos modos de funcionamiento, los cuales permiten que la mota continúe funcionando con un comportamiento aletargado incidiendo directamente a la reducción del consumo de energía.

A continuación, se explicará brevemente cómo es posible, para el Wasp mote, pasar del modo de funcionamiento habitual de “alto consumo” con una corriente igual a 9mA a modos aletargados incurriendo en gastos energéticos iguales a 0,7 μ A

ON: Es el modo de funcionamiento corriente. Aquí se presentan todo tipo de interrupciones.

Hibernación: Aquí se paralizan todas las funcionalidades del módulo, dando lugar a un uso asíncrono, comúnmente dirigido por el Real Time Clock.

Sleep: Es el modo donde se detienen algunas de las funcionalidades del módulo y da paso a un funcionamiento asíncrono, comúnmente dirigido por los módulos sensoriales, de comunicación o temporizadores.

DeepSleep: Es un modo parecido al sleep, donde el microprocesador no presta atención a los pulsos creados por su reloj, esto se presenta hasta el momento en que haya una interrupción generada por la Real Time

Clock o un sensor, despertando de esta manera al microprocesador.

En la Tabla 11 se puede observar el consumo energético, el ciclo y las interrupciones de los modos de funcionamiento del Waspote.

Modos	Consumo	Micro	Ciclo	Interrupciones
On	15 mA	On	---	Sincrónicas (Watchdog) y Asincrónicas
Sleep	55 uA	On	32ms - 8s	Sincrónicas y Asincrónicas
DeepSleep	55uA	On	1s - min/horas/días	Sincrónicas (RTC) y Asincrónicas
Hibernate	0,06uA	Off	1s - min/horas/días	Sincrónicas (RTC)

Tabla 11: Modos de Funcionamiento del Waspote [3]

Al describir las características principales de los dispositivos electrónicos a utilizar en el diseño, es de suma importancia describir su funcionamiento en conjunto, como lo muestra Figura 3.9.

Al inicializar el proceso, se setean las variables a utilizar (temperatura, humedad, monóxido de carbono y dióxido de carbono), al conectar los dispositivos a la red Zigbee, se puede obtener dos resultados. El primero, que se conecte a la red y caso contrario, que no exista conexión. Si se encuentra en el primer caso los sensores se preparan para empezar a transmitir los datos, cuando se efectúe el envío de la primera trama, al instante de haberse enviado a la trama, los demás sensores entran en actividad empezando a transmitir, por ende, envían la información.

Una vez enviada la segunda trama los sensores entran en un estado de bajo consumo de energía hasta un tiempo determinado (el cual puede variar de acuerdo a los requerimientos de implementación) y se activan nuevamente formando un ciclo repetitivo con la lectura y transmisión de datos.

Si se presenta el segundo caso, la red busca al nodo coordinador, determinando que no existe conexión volviendo a inicializar las variables hasta que se puedan conectar, formándose un proceso cíclico.

Descripción del transceptor

En el presente proyecto se propone utilizar un módulo de Xbee fabricado por la empresa Digi, el cual se comunica con el microcontrolador utilizando el UART_0 y UART_1 a 115.200 bps y ha sido elegido por su alta sensibilidad de recepción y potencia de transmisión. En la figura 3.6 se puede observar el dispositivo con su antena.



Figura 3.9 Módulo Xbee-Pro [2]

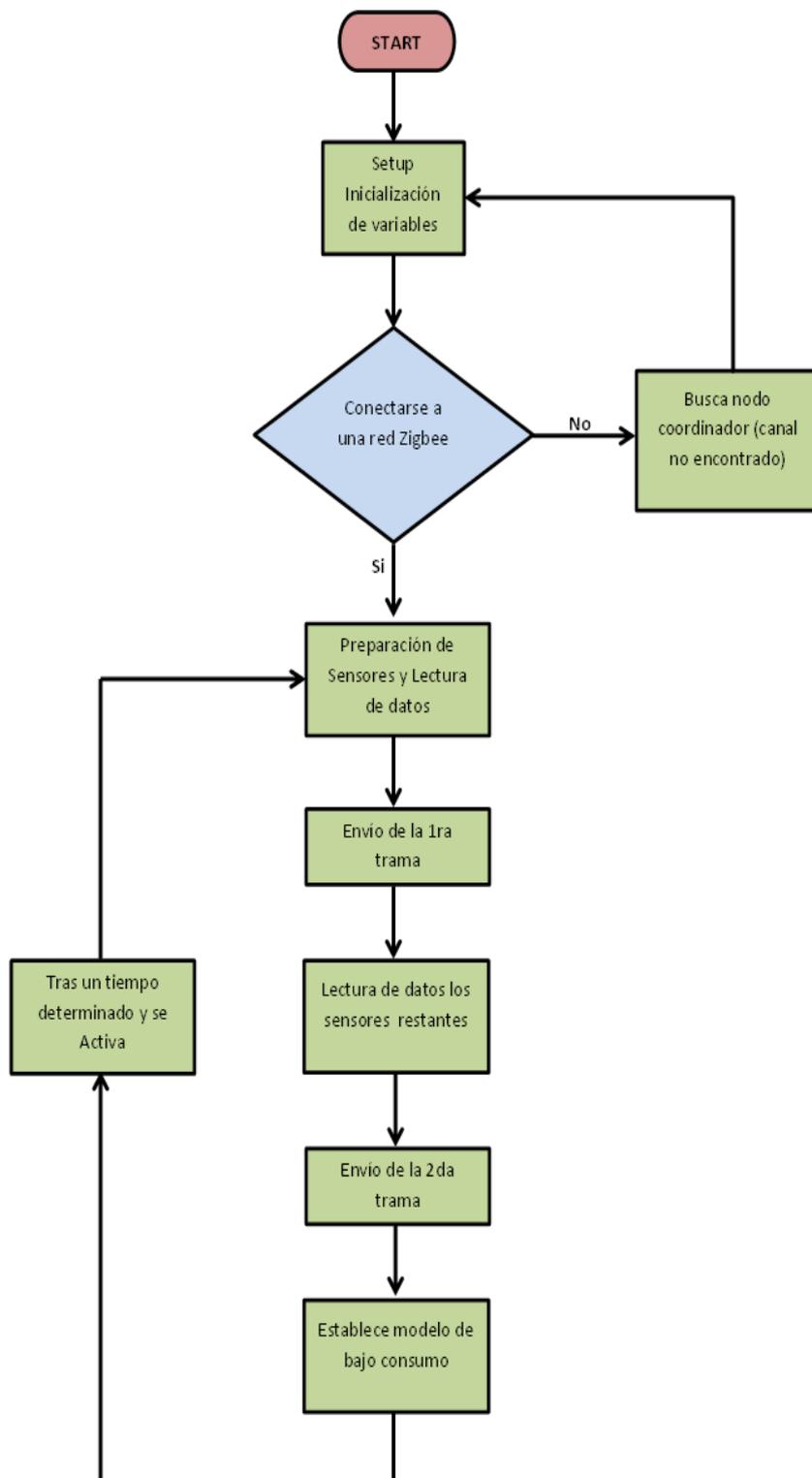


Figura 3.10 Diagrama de bloque Wasp mote [3]

Este módulo trabaja en la frecuencia no licenciada de 2,4 GHz, con una potencia de transmisión de 63.1mW y en condiciones ideales cubre una distancia de 7km.

Agrega ciertas particularidades a la red tales como:

Descubrimiento de nodo: Se añaden algunas partidas para que otros nodos dentro de la misma red pueden ser descubiertos, lo que permite el descubrimiento del nodo a quien se enviará el mensaje, de manera que el resto nodos responden a la red que indica su información específica [2].

Detección de paquetes duplicado: Esta funcionalidad no está establecido en la norma y se añade por los módulos XBee [2]

En la Figura 3.11 se muestra la parte superior y vista lateral del módulo en mención.

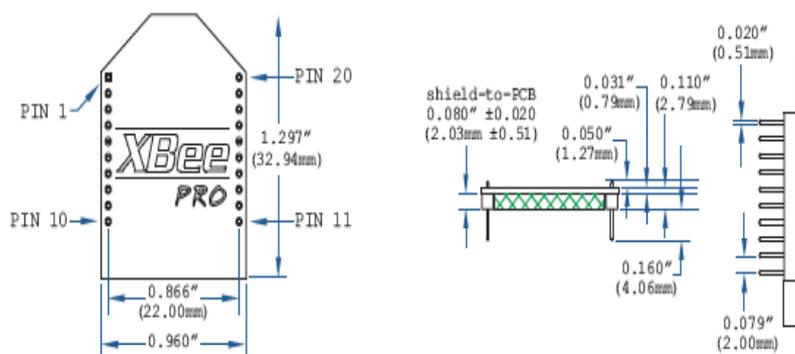


Figura 3.11 Parte superior y de lado (respectivamente) del módulo XbeePro [2]

Parámetros que se deben tomar en cuenta para la configuración del Xbee-Pro [2]:

Dirección MAC: Es de 64 bits y fundamental para establecer conexiones punto a punto entre los nodos. Identifica de forma única un nodo dentro de una red debido a que no puede ser modificado y está dado por el fabricante.

Dirección de Red: Identifica un nodo dentro de una red y es igual a 16 bits. Se usa para enviar datos a un nodo en transmisiones de unidifusión de 16 bits.

PAN ID: Con 16 bits, los cuales son identificados por la red. Es único, ya que esto permita identificar cada red. Cabe recalcar que todos los nodos deberán utilizar el mismo PAN ID en una red.

Identificador de nodo: Viene dada por una cadena ASCII máxima de 20 caracteres, el cual identifica el nodo en una red, en la capa de aplicación.

Canal: Define el parámetro de frecuencia usado por el módulo para transmitir y recibir. Es de suma importancia que los nodos se encuentren en el mismo canal.

Alimentación por panel solar rígido

El panel solar debe ser conectado mediante el puerto programado, mostrado en la Figura 3.12, ya que se tiene un puerto distinto para la conexión de batería. Sólo se permite una posición de conexión que debe ser respetada sin ser forzados a la posición incorrecta. De este modo se respeta la polaridad de conexión. Se pueden conectar paneles solares hasta 12V y potencia de 4Watts [3].

Por cuestiones de seguridad el diseño del módulo, tiene un circuito de control y seguridad, donde la corriente de carga del panel solar sea siempre adecuada.

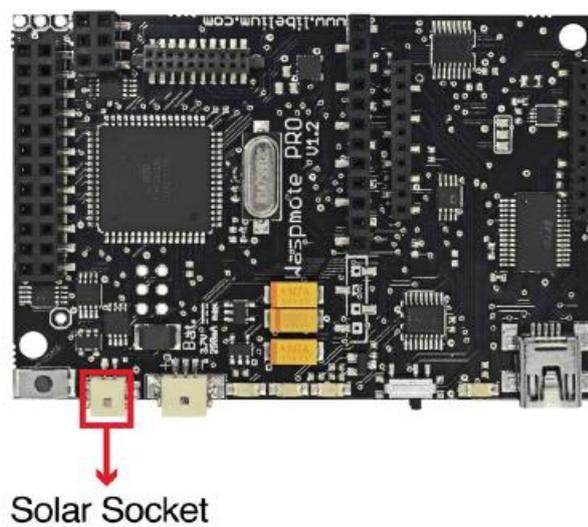


Figura 3.12 Socket Alimentación Solar [3]

El panel solar rígido (figura 3.9) a utilizar genera un voltaje igual a 7V con corriente de 500mA y potencia máxima de 3Watts [3].

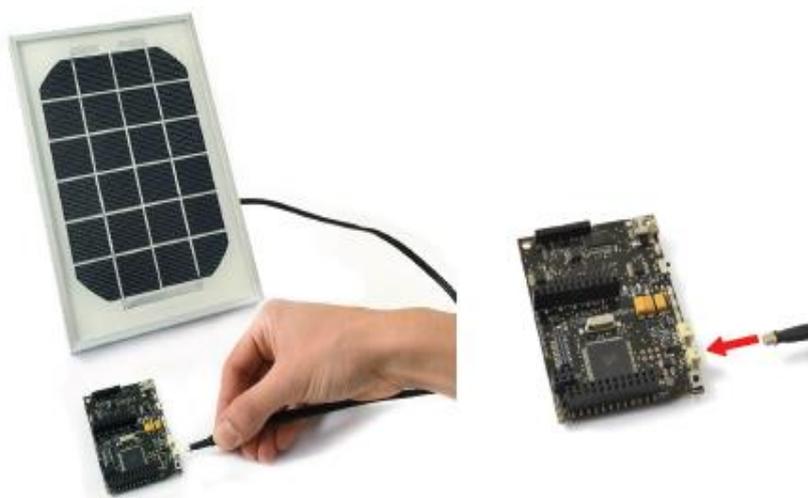


Figura 3.13 Conexión Panel Solar [3]

Gateway

Dispositivo detallado en el capítulo 2, el cual es conocido por ser la puerta de enlace entre la red y el pc. En la Figura 3.14 se muestra el dispositivo.

Una vez que la puerta de enlace se ha instalado correctamente, se genera una comunicación directa con el UART del módulo XBee, el cual se encuentra en el equipo de recepción, lo que permite que el XBee se comunique con el dispositivo, pudiendo ambos recibir paquetes de datos de la red de sensores, así como modificar y / o consultar los parámetros de configuración del XBee. A continuación, se detalla en la figura 3.15 la conexión del Gateway al pc.

Una vez que la puerta de enlace se ha instalado correctamente, se genera una comunicación directa con el UART del módulo XBee, el cual se encuentra en el equipo de recepción, lo que permite que el XBee se comunique con el dispositivo, pudiendo ambos recibir paquetes de datos de la red de sensores, así como modificar y / o consultar los parámetros de configuración del XBee. A continuación, se detalla en la Figura 3.15 la conexión del Gateway al pc.



Figura 3.14 Gateway [3]

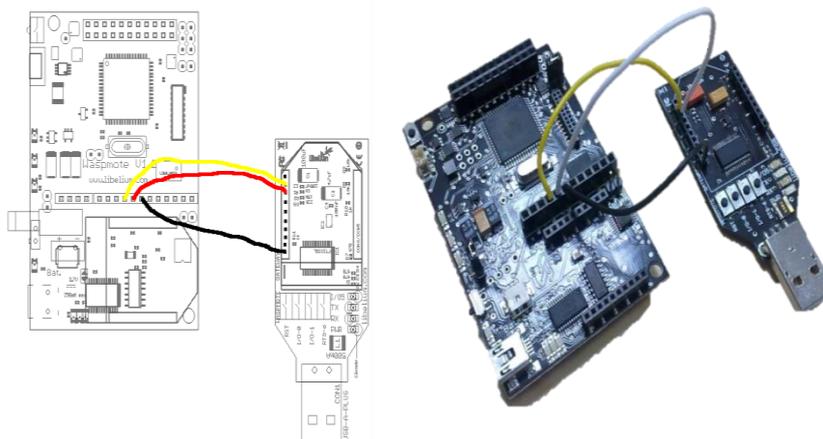


Figura 3.15 Conexión Gateway & Wasp mote

Hasta el momento se ha procedido a detallar el “cerebro” de la red, a continuación, se tratará sobre el módulo de sensores, los cuales ya están definidos por el fabricante (Libelium).

Este módulo es diseñado para controlar parámetros ambientales tales como temperatura, humedad, presión atmosférica y 14 tipos diferentes de gases como CO, CO₂, O₂, NH₃, entre otros, como se muestra en la Figura 3.16. Permite la instalación de 7 sensores de gases, simultáneamente, la regulación de su energía viene dada por un sistema de conmutadores de estado sólido. La señal de salida de cada uno es amplificada por medio de una etapa de amplificación no inversora, con una ganancia máxima igual a 101, la misma que es controlada por un potenciómetro digital configurable.

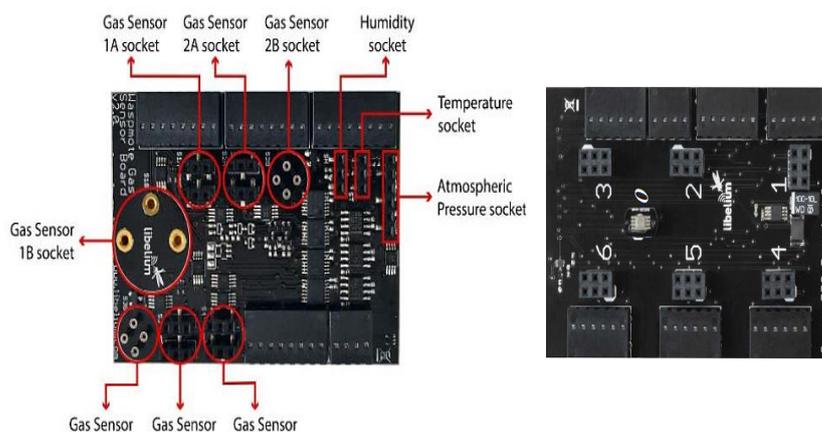


Figura 3.16 Cara superior e inferior del Módulo de Sensores [3]

Los distintos conectores del módulo de Gases pueden utilizarse para la integración de diferentes sensores, cumpliendo las características eléctricas definidas en el Wasmote. Los sensores que se detallaran a continuación, fueron elegidos de acuerdo a las variables mencionadas en el capítulo 2 acerca de los incendios forestales y la compatibilidad que tienen respecto la Wasmote de la empresa Libelium.

3.5.2 Sensores

Sensores son los encargados de recibir la información del medio (señal física) y convertirla a una señal de distinta naturaleza, generalmente es voltaje. De esta forma posee la capacidad de medir y manipular la información que recibe. Por ejemplo, un sensor de temperatura produce un voltaje que está relacionado directamente con la temperatura del medio. Por el origen de la señal, los sensores se dividen en dos grupos: Los pasivos, quienes necesitan de una fuente de energía para generar la señal de salida y los activos que sin necesidad de alimentación energética crean la señal de salida [42].

3.5.2.1 Monóxido de Carbono (CO)

El sensor a utilizar es 4-CO-500 que se puede observar en la Figura 3.17, el cual trabaja una corriente que es linealmente proporcional al volumen fraccional del CO objetivo. Estos sensores son compuestos por tres bandas metálicas conectadas a cada electrodo del sensor, las cuales cumplen con las siguientes funciones: El electrodo de trabajo reacciona con el CO a fin de generar una corriente. El electrodo contador suministra una corriente de los saldos generados por la corriente del electrodo de trabajo y por último si tiene el electrodo de referencia quien define el potencial (tensión de polarización) de funcionamiento del electrodo de trabajo.



Figura 3.17 Sensor de CO [4]

En la Tabla 12 se mencionan características importantes de sensor CO. Con lo que respecta a su conexión a la placa, se lo puede colocar en cualquier posición respecto a los sockets del Módulo, como se muestra en la Figura 3.18

Rango de Temperatura	-20 °C to 50 °C
Humedad	15 to 90% RH
Rango de Presión	90 to 110 kPa
Vida útil de funcionamiento	5 años

Rango Nominal	0 to 500 ppm
Máxima carga	2000 ppm
Tiempo de Respuesta	≤ 30 segundos
Sensibilidad	70 ± 15 nA/ppm
Precisión	± 1 ppm * (condiciones ideales)

Tabla 12: Características del Sensor de CO [4]

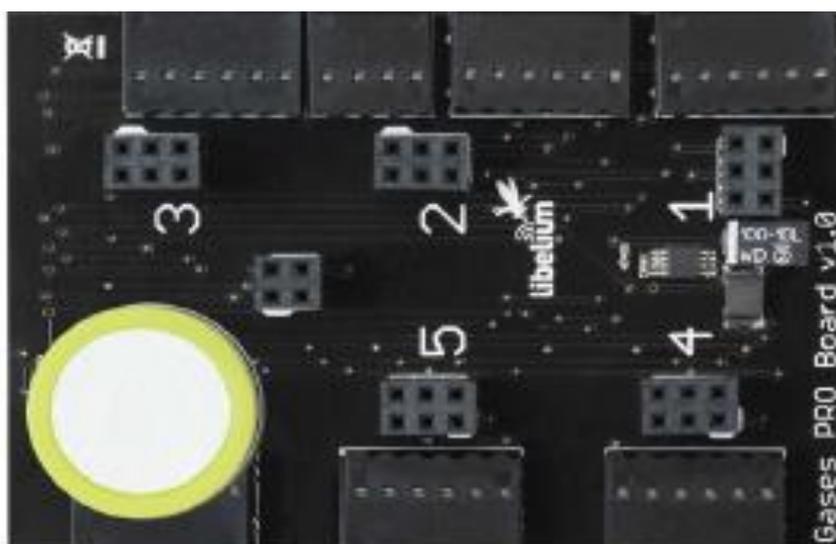


Figura 3.18 Sensor CO incorporado en el módulo [4]

3.5.2.2 Sensor de Dióxido de Carbono (CO₂)

El sensor a utilizar es el INE20-CO₂P-NCVSP, de la serie de sensores de detección por infrarrojo, el mismo que utiliza la técnica de NDIR (infrarrojo no dispersivo) para controlar la presencia de hidrocarburos o dióxido de carbono. Esta técnica se basa en el hecho de que el gas tiene una absorción de luz única y viene definida por curva en el espectro infrarrojo que se utiliza para identificar el gas. La concentración de gas se puede determinar mediante el uso de una fuente de infrarrojo adecuada y el análisis de la absorción óptica de la luz que pasa a través del gas. En la Figura 3.19 se muestra el sensor de CO₂.



Figura 3.19 Sensor de CO2 [4]

Rango de Temperatura	-40 °C a 60 °C
Humedad de funcionamiento	0 a 95 % HR
Vida útil de funcionamiento	≥ 5 años
Rango Nominal	0-5000 ppm
Tiempo de Respuesta	≤ 60 segundos
Presición (condiciones ideales)	± 50 ppm * , 0-2500 rango de ppm
Tiempo de calentamiento	60 segundos a 25 ° C
Resolución	25 ppm

Tabla 13: Características del Sensor de CO2 [4]

En la Tabla 13 se mencionan características importantes de sensor CO2. Con lo que respecta a su conexión a la placa, se lo puede colocar en cualquier posición respecto a los sockets del Módulo, como se muestra e la Figura 3.20.

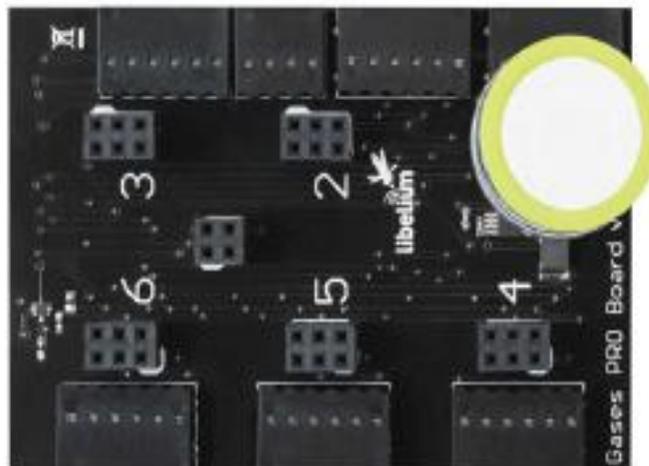


Figura 3.20 Sensor CO2 incorporado en el módulo [4]

3.5.2.3 Sensor de Temperatura y Humedad

El sensor a utilizar es el BME280 de Bosch SENSORTEC, el cual cuenta con un tiempo de respuesta extremadamente rápido, por lo cual soporta los requisitos de rendimiento demandados por el módulo de Sensores. El BME280 es de alta precisión en un amplio rango de temperatura y humedad, ha sido optimizado para muy bajo ruido y alta resolución. En la Figura 3.21 se especifica las dimensiones del sensor y se muestra una vista frontal del mismo.



Figura 3.21 Sensor de temperatura y humedad [4]

En la Tabla 14 se mencionan características importantes de sensor CO2. Con lo que respecta a su conexión a la placa, se lo puede colocar en cualquier posición respecto a los sockets del Módulo, como se muestra e la Figura 3.22.

Rango de funcionamiento	-40 a 85 ° C
Precisión	± 1 °C (rango de 0 °C a 65 °C)
Tiempo de respuesta	1,65 segundos (63 % a la respuesta de +30 +125°C)
Consumo típico	1,8 mμ
Consumo máximo	2,8 mμ
Rango de medición	0 a 100% de humedad relativa (para temperaturas entre 0 °C y 60 °C)
Precisión	± 3 % de humedad relativa (a 25 °C, rango de 20 a 80 %)
Tiempo de respuesta	1 segundo

Tabla 14: Características del Sensor de Temperatura y Humedad [4]

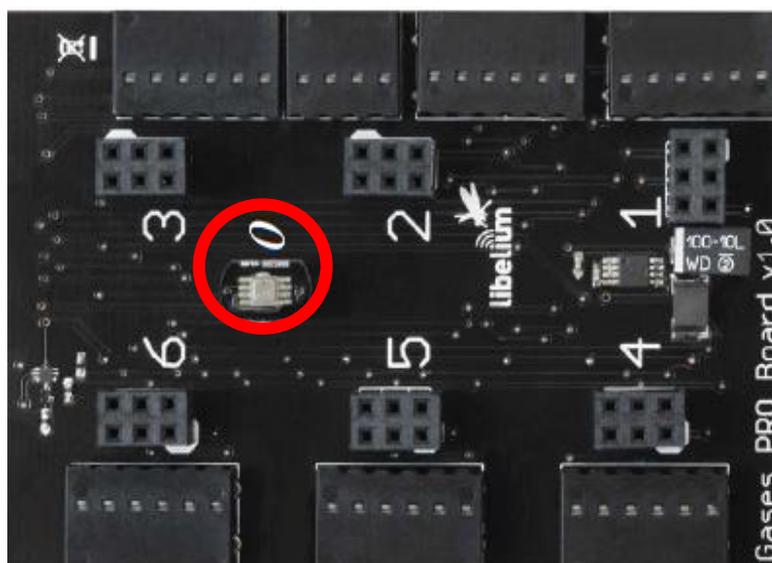


Figura 3.22 Sensor temperatura y humedad incorporado en el módulo [4]

Tomas de corriente

A continuación, se podrá observar en la figura 3.23 (a), la toma dada para cada pin con su correspondiente entrada y la de los sensores. En el presente proyecto se utilizarán los sockets 0,1 y 6, correspondientes a los pines 1, 2, 3, 4, 5, 6, 13, 14, 15,16, 23, 24, 25,26, 27 y 28 que se puede observar en la figura 3.23 (b)

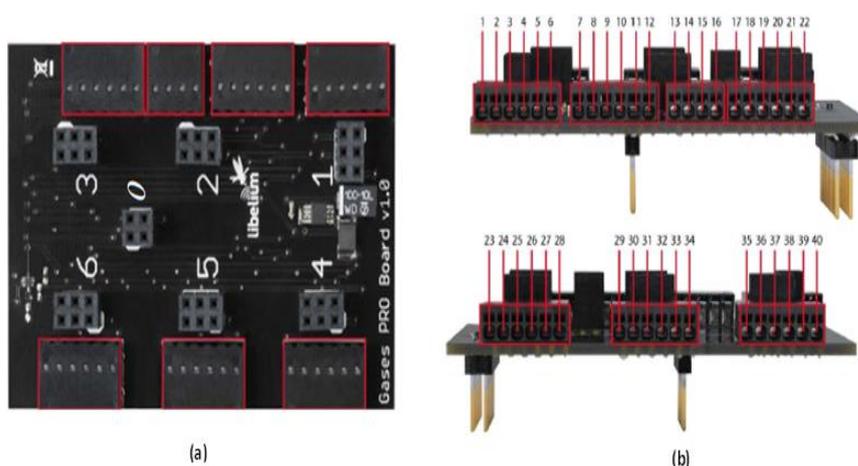


Figura 3.23 Tomas de corriente y pines (Módulo de Sensores) [4]

En la Tabla 15 se puede observar la distribución de los pines a utilizar del módulo de Sensores.

Sensor	Pin	Función
Temperatura & Humedad Socket 0	13	Tierra
	14	Alimentación (+3V)
	15	SCL
	16	SDA

Sensor	Pin	Función
CO2 Socket 1	1	Alimentación (+ 3V)
	2	Alimentación Activa
	3	Activación I2C

	4	SDA
	5	SCL
	6	Tierra
Sensor	Pin	Función
O Socket 6	23	Tierra
	24	Alimentación (+ 3V)
	25	Alimentación Activa
	26	Activación I2C
	27	SDA
	28	SCL

Tabla 15: Distribución de pines del módulo de sensores [4]

3.5.3 Meshlium

Este dispositivo trabaja como router (figura 3.24), trabaja con una interfaz de radio de 2,4Ghz, cabe recalcar que puede trabajar a cuatro frecuencias más, también se lo puede utilizar como un módulo GPS, característica que le permite estar implementado al aire libre y en cualquier lugar [5].



Figura 3.24 Dispositivo Meshlium [5]

En la tabla 16 se especifica características técnicas del dispositivo

Especificaciones Técnicas	
Procesador	500Mhz
RAM	256MB
Disco duro	16 GB
Fuente de alimentación	PoE (Ethernet)
Dimensiones	210x175x50mm
Peso	1.2kg
Rango de temperatura	-20°C a 50°C
Fuente de Voltaje	12V-DC
Zigbee-Xbee PRO	
Frecuencia	2.4Ghz
Potencia de transmisión	50mW
Antena	5dbi dipolo
Cobertura	7Km

Tabla 16: Especificaciones técnicas Meshlium y Zigbee [5]

3.6 Diseño de la WSN

Diseñar la red implica un análisis de propagación previo a la determinación del número de dispositivos que se requiere para cubrir el escenario elegido. En esta sección se definirán parámetros necesarios para que exista una comunicación estable entre los nodos sensores; cuando se hace mención a la estabilidad del enlace se hace referencia al nivel de señal que se recibe en función de dichos parámetros y a la información que se recibe, esta debe de ser la misma a la información que se transmitió. Se enfatiza que el diseño de la red se realizará considerando un entorno en condiciones climatológicas normales, es decir, sin considerar pérdidas por lluvia o niebla.

Los parámetros principales son: Sensibilidad, frecuencia, Potencia del transmisor, figura de ruido, velocidad y SNR (relación señal-ruido). El nodo sensor elegido para el diseño tiene la capacidad de trabajar con diversos módulos de radio de la banda.

El Xbee-802.15.4-Pro trabaja en 2.4Ghz y sus especificaciones satisfacen las necesidades del diseño. Además, tiene la suficiencia de añadir una antena externa con ganancia de 3 dB a 5Db.

Especificaciones del Xbee	
Frecuencia	2.4Ghz
Velocidad de transmisión	250Kbits/segundo
sensibilidad	-100dBm
potencia de transmisión	63.1mW (18dBm)

Tabla 17: Especificaciones del módulo Xbee 802.15.4 Pro [32]

Este módulo puede llegar a transmitir hasta 250 kbps con una sensibilidad de -100dBm y una potencia de transmisión de 18dBm tal como se muestra en la Tabla 17.

Para definir el número de nodos sensores que se necesita para cubrir el escenario en cuestión, es necesario determinar la distancia máxima que existirá entre los mismos. Con esto se asegurará la estabilidad de los enlaces de comunicación y la mínima posibilidad de aislamiento para algún nodo. El aislamiento de un nodo se da por la relación señal ruido que existe en el enlace de radio entre emisor y receptor. Para el estándar que se está usando, el SNR mínimo es de 3dB al transmitir a una velocidad máxima de 250Kbits por segundo tal como se observa en la Tabla 18. Si la relación señal ruido del enlace es menor o igual al mínimo que permite el estándar, la información que se recepte llegará con ruido.

El diseño propuesto tiene el objetivo de garantizar la comunicación en presencia de una potencia de ruido media tomada en un entorno real de la ciudad de Guayaquil. Para un diseño con mínimo margen de error, se realizará un análisis de propagación para calcular la potencia ínfima de recepción usando las especificaciones del estándar y las especificaciones del módulo de radio Xbee Pro.

Especificaciones del estándar 802.15.4	
SNR mínimo	3 dB
Figura de ruido (NF)	11.5dB

Tabla 18: Especificaciones del estándar 802.15.4 [28]

3.6.1 Análisis Matemático

Para realizar este análisis, se usarán las ecuaciones correspondientes al presupuesto de un enlace inalámbrico, pérdidas en el camino y el teorema de Shannon. Es necesario calcular la potencia mínima de recepción usando la sensibilidad del módulo receptor, la relación señal ruido y figura de ruido del estándar para poder determinar el alcance

de la mota y la distancia máxima entre el nodo coordinador y el Gateway en función el presupuesto de enlace.

Hay que recalcar que el presupuesto de enlace depende directamente de las pérdidas que existen debido al entorno, dichas perdidas también se pueden dar por la línea de vista entre emisor y receptor. Una vez más el escenario se involucra de manera directa en el diseño, ya que los nodos serán ubicados en un entorno lleno de vegetación, es decir que probablemente los nodos no tengan línea de vista entre sí.

El alcance calculado en función del presupuesto de enlace, y por ende de las pérdidas de potencia de la señal transmitida, será el fundamento teórico para definir el número de nodos que se necesitan para cubrir todo el bosque, y para determinar a qué distancia deben de estar el nodo coordinador y el Gateway para que la información llegue sin ruido.

Se calculará la relación señal ruido en función de la potencia de ruido alta, media y baja tomadas en un entorno suburbano de la ciudad de Guayaquil. Dicho valor permitirá hallar la capacidad máxima del canal usando el teorema de Shannon.

La ecuación 3.1 permitirá calcular la potencia mínima de recepción en función de los valores mínimos de SNR y NF que permite el estándar.

$$Prx_{min} = S + SNR + NF \quad (3.1)$$

$$Prx_{min} = -100dBm + 3dB + 11.5dB$$

$$Prx_{min} = -85.5dBm$$

Prx_{min} es la minima potencia que el dispositivo recepta e interpreta como informacion..

Presupuesto de enlace

Un presupuesto de enlace es de gran ayuda para determinar parámetros esenciales del enlace. Se usará la ecuación 3.2 para demostrar teóricamente la relación directa entre la potencia de

recepción y las pérdidas de propagación tal como se muestra en la ecuación 3.3.

$$Prx = Ptx + Grx + Gtx + L \quad (3.2)$$

$$Prx = 18dBm + 5dBm + 5dBm + L$$

$$\mathbf{Prx = 28dBm + L} \quad (3.3)$$

Es forzoso hallar las pérdidas de propagación en base a un modelo que valla acorde al escenario en donde se está realizando el análisis. Existen algunos modelos de propagación para sectores con follaje, pero se ha decidido usar "Multipath fading" debido al cálculo estricto de pérdidas.

Modelo de Propagación Multipath fading

Como se me mencionó en el capítulo anterior, este modelo permite calcular las pérdidas por reflexión, refracción y dispersión de la señal. Para esto es necesario definir la frecuencia central que se usará, ya que el estándar Zigbee tiene 16 canales con 16 frecuencias distintas y ancho de banda de 3Mhz. La capa física del estándar permite la elección del canal con menor interferencia. A razón de esto, para efectos del análisis matemático, se ha tomado la frecuencia central de 2.45Ghz.

Cabe recalcar que la frecuencia central es definida en base a la disponibilidad del canal, y para esto es necesario realizar un análisis espectral de la banda de 2.4Ghz en el bosque protector Cerro Colorado.

$$L_{multipath}(dB) = -(10\gamma \log(d) + L_{freeSpace}[1metro] + L_{absorcion}) \quad (3.4)$$

Las pérdidas en el espacio libre vienen dadas por:

$$L_{freeSpace}(dB) = -(20 \log(d) + 20 \log(f) - 27.5) \quad (3.5)$$

$$L_{freeSpace}(dB) = -(20 \log(d) + 20 \log(2450) - 27.5)$$

$$L_{freeSpace}(dB) = -20 \log(d) - 40.28$$

Las pérdidas en el espacio libre a 1 metro de distancia,

$$L_{freeSpace}(dB) = -40.28$$

El exponente de pérdidas por dispersión y las pérdidas por absorción vienen dadas en la Tabla 19 según la aplicación.

Aplicación para exteriores	Exponente de dispersión	Pérdidas por absorción(dB)
Espacio libre	2	0
Presencia de árboles	3 a 4	10 a 20
Edificios	4	0

Tabla 19: Especificaciones de pérdidas en función de la aplicación

Enlace entre Nodo sensor y Nodo Coordinador

Se usará el exponente de dispersión y pérdidas de absorción para una aplicación en exteriores en presencia de árboles.

Reemplazando los valores que determinan el **mejor escenario** ($\gamma = 3$, $L_{absorción} = 10dB$) en la ecuación 3.4,

$$L_{multipath}(dB) = -(30 \log(d) + 40.28 + 10)$$

$$L_{multipath}(dB) = -30 \log(d) - 50.28 \quad (3.6)$$

Reemplazando la ecuación 3.6 en la ecuación 3.3,

$$Prx = 28 - 30 \log(d) - 50.28$$

$$Prx = -30 \log(d) - 22.28 \quad (3.7)$$

Usando la potencia mínima de recepción en la ecuación 3.7,

$$-85.5 = -22.28 - 30 \log(d)$$

$$30 \log(d) = -22.28 + 85.5$$

$$\log(d) = 2.10$$

$$d_{max} \approx 125m$$

Reemplazando los valores que determinan el mejor escenario ($\gamma = 4$, $L_{absorcion} = 20dB$) en la ecuacion 3.4,

$$\begin{aligned} L_{multipath}(dB) &= -(40 \log(d) + 40.28 + 20) \\ L_{multipath}(dB) &= -(40 \log(d) + 60.28) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Reemplazando la ecuacion 3.8 en la ecuacion 3.3

$$\begin{aligned} Prx &= 28 - 40 \log(d) - 60.28 \\ Prx &= -40 \log(d) - 32.28 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Usando la potencia minima de recepcion en la ecuacion 3.9,

$$\begin{aligned} -85.5 &= -32.28 - 40 \log(d) \\ 40 \log(d) &= -32.28 + 85.5 \\ \log(d) &= 1.25 \end{aligned}$$

$$d_{max} \approx 21 m$$

Se ha calculado el alcance del nodo en función de dos escenarios tal como se muestra en la Tabla 20. Para un escenario optimista con perdidas por absorcion de 10db y coeficiente de dispersion de 3db el alcance es de aproximadamente 125m, mientras que para un escenario pesimista con perdidas por absorcion de 20db y coeficiente de dispersion de 4db el alcance es de aproximadamente 21m. es decir, el alcance es inversamente proporcional a las perdidas de propagación.

Escenarios	Alcance máximo
Optimista	125m
Pesimista	21m

Tabla 20: Alcance máximo en función del escenario

Enlace entre nodo coordinador y Gateway

Para realizar en análisis matemático de dicho enlace es necesario recordar que el Gateway tiene que estar en un lugar seguro y de fácil acceso a energía debido a su conexión por cable ethernet con una PC. Por lo tanto, se puede concluir que el enlace entre el nodo coordinador y el Gateway no será a través del bosque. Se usará el exponente de dispersión y pérdidas de absorción para una aplicación en exteriores en espacio libre.

Reemplazando $\gamma = 2$, $L_{absorcion} = 0dB$ en la ecuacion 3.4

$$L_{multipath}(dB) = -(20 \log(d) + 40.28)$$

$$L_{multipath}(dB) = -20 \log(d) - 40.28 \quad (3.10)$$

Reemplazando la ecuacion 3.10 en la ecuacion 3.3

$$Prx = 28 - 20 \log(d) - 40.28$$

$$Prx = -20 \log(d) - 12.28 \quad (3.11)$$

Usando la potencia minima de recepcion en la ecuacion 3.11

$$-85.5 = -12.28 - 20 \log(d)$$

$$20 \log(d) = -12.28 + 85.5$$

$$\log(d) = 3.66$$

$$d_{max} \approx 4.57 \text{ km}$$

El alcance ha sido calculado usando el SNR mínimo del estándar, pero es necesario recalcar una vez más que, para un análisis más preciso habría que realizar un análisis espectral de la banda de 2,4Ghz en el escenario para definir el comportamiento de la potencia de ruido y la disponibilidad de canales en el sector, debido a que existen zonas suburbanas aledañas al bosque y hay la posibilidad de que algún canal este saturado.

Para realizar el cálculo del SNR en función de la potencia de ruido real que existe en el sector se ha considerado como referencia los valores de potencia de ruido que se han tomado en una zona suburbana de Guayaquil tal como se muestra en la Tabla 21.

Sabiendo que

$$SNR(dB) = P_{rx(dB)} - P_{ruido(dB)} \quad (3.12)$$

Usaremos la potencia de ruido del canal 9, ya que a priori se ha elegido el canal de trabajo para este análisis.

$$SNR(dB) = -85.5dB + 94.5dB$$

$$SNR(dB) = 9$$

Para esta potencia de ruido el SNR calculado es mayor al SNR mínimo que se permite. Esto quiere decir que la información transmitida en presencia de ruido con potencia de -94.5dB no se verá afectada y se la receptara de una manera eficiente.

En la Tabla 22 se muestra el cálculo del SNR para las diferentes potencias de ruido.

CANAL	Máximo	Mínimo	Media
Canal 1	-55.166	-107.019	-89.4386
Canal 2	-55.1666	-104.599	-96.0243
Canal 3	-56.639	-104.599	-95.7987
Canal 4	-56.639	-108.163	-95.6825
Canal 5	-43.918	-102.68	-95.5463
Canal 6	-43.918	-102.68	-95.6225
Canal 7	-43.918	-103.08	-95.9226
Canal 8	-43.918	-102.661	-96.349
Canal 9	-55.965	-102.821	-94.499
Canal 10	-57.026	-102.301	-96.2852
Canal 11	-57.026	-103.647	-96.1246
Canal 12	-57.026	-107.579	-93.1318
Canal 13	-57.026	-102.643	-92.4546

Tabla 21: Potencia de ruido de 2.4Ghz en zonas sub-urbanas

<i>Máximo</i>	<i>Medio</i>	<i>Mínimo</i>
-29.5db	9db	17.3db

Tabla 22: SNR en función de la variación de potencia de ruido

En presencia de ruido medio y ruido bajo el SNR será mayor al mínimo que permite el estándar y la comunicación será estable entre emisor y receptor. El problema que se presenta en nuestro escenario es cuando la potencia de ruido llega a su máximo, debido a que la relación señal ruido es mucho menor al mínimo valor de SNR que permite el estándar. A razón de esto la señal transmitida será tomada como ruido y en términos más amigables la alerta de una posible zona de riesgo no será interpretada por el receptor.

Una posible solución a este problema es variar la distancia entre los nodos sensores teniendo como límite el alcance teórico hallado. Esto permitirá que las pérdidas en el camino disminuyan y el nivel de señal que se recepte pueda tolerar la potencia de ruido máxima.

Capacidad máxima del canal

El Teorema de Shannon nos permite calcular la capacidad máxima del canal para así asegurarnos que la información que se está transmitiendo esté libre de ruido si su velocidad es menor o igual a dicha capacidad.

$$CC_{max} = \left(\frac{B}{8}\right) \log_2\left(1 + 10^{\frac{SNR}{10}}\right) \quad (3.13)$$

Para SNR=9dB

$$CC_{max} = \left(\frac{3000000}{8}\right) \log_2\left(1 + 10^{\frac{9}{10}}\right)$$

$$CC_{max} = 1.185 \times 10^6 \frac{\text{bit}}{\text{seg}}$$

Cabe recalcar que el ancho de banda se lo divide para 8, debido a que en un entorno real el estándar necesita de una sub portadora para transmitir y de otra sub portadora para recibir.

3.6.2 Localización geográfica de la red

Teniendo como soporte el análisis matemático que se realizó anteriormente, se ha hecho la ubicación de cada nodo sensor con un radio de cobertura de 125m mediante un GPS Garmin, obteniendo así las coordenadas de cada punto. Con ayuda de esto se ha procedido a graficar cada coordenada en el software Google Earth, tal como se muestra en la Figura 3.25.

Se ha hecho uso de 102 nodos para cubrir todo el sector, de lo cual 101 nodos son sensores y un nodo es coordinador.

Para ubicar cada nodo se ha partido por la ubicación del nodo coordinador al borde del bosque protector con una ciudadela aledaña a él. La tabla de coordenadas esta detallada en los anexos del documento.



Figura 3.25 Ubicación geográfica de los nodos sensores

CAPÍTULO 4

4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realizará la simulación de capa física de la red diseñada mediante Matlab. Para elegir el software de simulación se ha tomado en cuenta la disponibilidad del mismo, es decir que tenga licencia libre. También se ha considerado la interfaz gráfica que ofrece, la habilidad y experiencia que se tiene para manejar el mismo.

Para tener una simulación de la red precisa se ha establecido un punto de referencia para obtener la coordenada de cada nodo en función de la misma y así poder simular en un plano de tres dimensiones.

4.1 Algoritmo

El algoritmo a usarse para la simulación de la red permitirá ver gráficamente la comunicación entre los nodos sensores en función del SNR calculado usando las especificaciones de los mismos. Para esto es necesario ingresar dichos parámetros como lo son la frecuencia central, la potencia del módulo de radio y la ganancia de la antena externa. Además, las coordenadas de cada nodo sensor.

Es necesario definir el número de nodos sensores utilizados en la red. Esto permitirá construir una matriz $N \times M$ en donde, N es el número de nodos sensores previamente definido, y M es el número de la dimensión que se desea graficar. Para la simulación del diseño realizado en el capítulo anterior la matriz será de tamaño 102×3 . Se graficará cada nodo sensor en un plano de tres dimensiones usando la matriz previamente definida. A continuación, se detallan los pasos a seguir:

Se calculará la distancia entre cada uno de los nodos con sus nodos adyacentes.

Calcular las pérdidas usando el modelo de propagación definido en el capítulo anterior.

Realizar presupuesto de enlace estableciendo la potencia de ruido con que se realizara la simulación.

Graficar la conectividad entre nodos en función del SNR obtenido.

Línea morada ; $3dB \leq SNR < 6dB$

Línea verde ; $6dB \leq SNR < 9dB$

Línea negra; $9dB \leq SNR < 12dB$

Línea azul; $SNR \geq 12dB$

Hallar la capacidad máxima usando el teorema de Shannon. Dicho valor será calculado en función del SNR de cada enlace existente.

4.2 Análisis de resultados

A primera instancia se ha hecho la simulación de la red en base al diseño realizado en el capítulo anterior, estableciendo la potencia de ruido media de -95 dBm para analizar la reacción de la red en presencia de la misma.

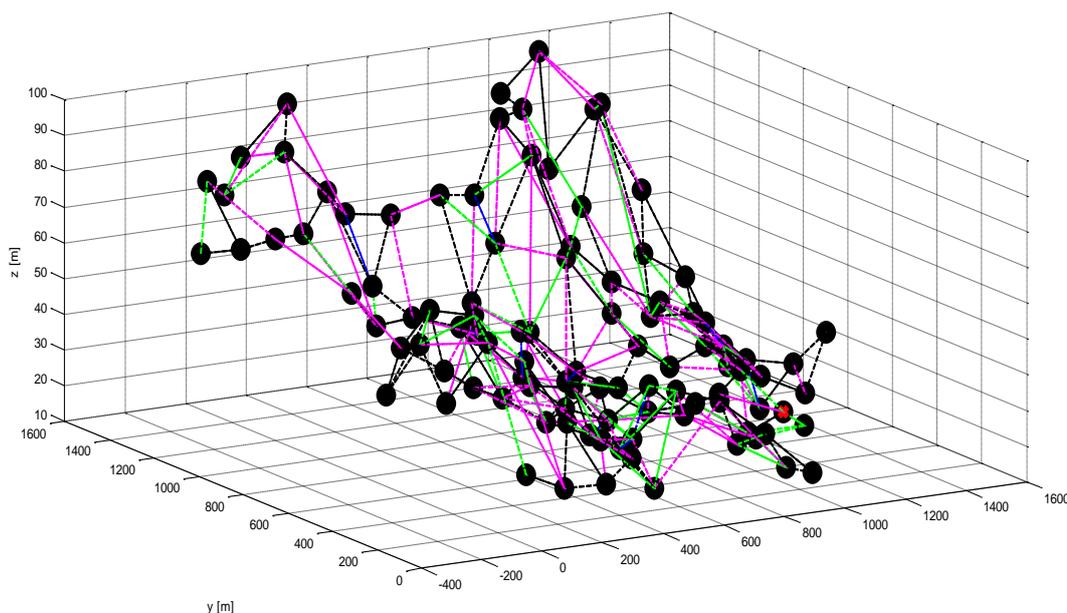


Figura 4.1 Distribución de la red WSN

Como se observa en la Figura 4.1, la distribución de la red usando los criterios mencionados en el capítulo anterior, permite que cada nodo sensor

tenga por lo menos un camino para llegar al nodo coordinador. Ningún nodo queda aislado, es decir que el SNR de cada enlace supera el mínimo que permite el estándar.

En la Figura 4.2 se observa con más precisión la cantidad de enlaces que tiene cada nodo y gráficamente se puede apreciar la relación señal ruido de cada uno de ellos. El Nodo coordinador (punto rojo) tiene una conexión directa con solo 5 nodos, los 97 nodos restantes tienen algunos caminos para poder llegar al mismo de una manera indirecta. Cual elegir, dependerá de los protocolos de encaminamiento, los cuales basaran su decisión en función de la eficiencia del mismo y del número de saltos que tenga que dar el paquete hasta llegar a su destino.

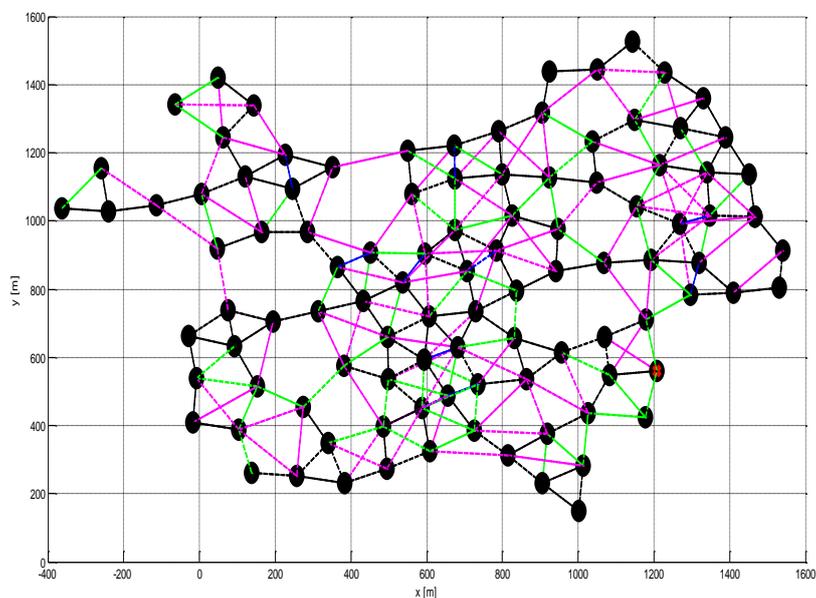


Figura 4.2 Plano dimensional de la distribución de la WSN en presencia de ruido con potencia de -92 dBm

Para determinar la eficiencia de la comunicación de los enlaces existentes, se ha graficado el SNR en función de la distancia entre el nodo coordinador y los nodos sensores tal como se muestra en la Figura 4.3, de la cual se puede afirmar que el SNR es inversamente proporcional a la distancia de cada enlace.

Debido a esto es que el nodo coordinador no tiene una comunicación directa con cada nodo sensor y se justifica una vez más la elección de la topología de la red. Es relevante recalcar esto ya que a primera instancia se había pensado en usar una topología punto a punto, pero el análisis del escenario y la distribución de los nodos nos permitió determinar la topología ideal para nuestra red.

Además, gráficamente se ha demostrado el número de conexiones que tiene el nodo coordinador. El mismo, no puede tener una conexión directa con los 102 nodos sensores debido a la distancia que existe entre cada uno de ellos, mientras más grande sea la distancia, menor será la relación señal ruido, siendo dominante el ruido.

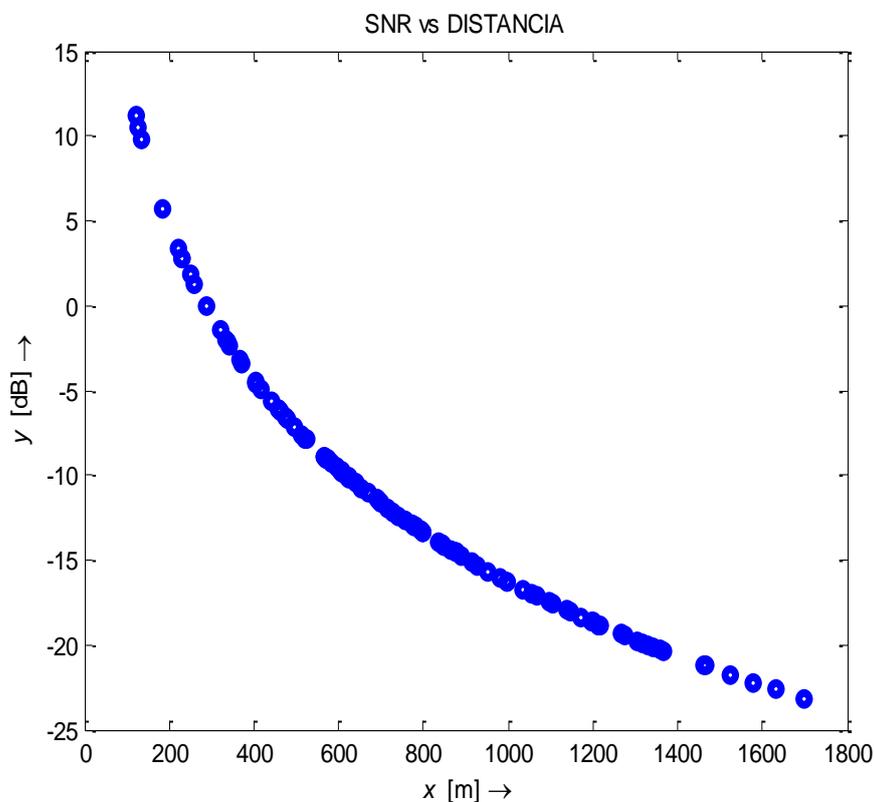


Figura 4.3 Variación del SNR en función de la distancia en presencia de ruido medio

La capacidad máxima del canal depende directamente del SNR. En la Figura 4.4 se observa que solo tres enlaces directos con el nodo coordinador tienen una capacidad mayor a 1 Mbit/s. Comparando estos valores con la capacidad teórica calculada en el capítulo anterior, se puede determinar que el error es mínimo. Para que la información transmitida desde estos 5 nodos sensores al nodo coordinador esté libre de ruido es necesario transmitir a una velocidad menor a su capacidad máxima.

La FDA (función de distribución acumulada), es una gráfica que permite asignar a cada valor definido sobre la variable a analizar, la probabilidad de que la variable tome dicho valor. Esta función necesita estar definida sobre el conjunto de todos los valores que toma la variable.

En la figura 4.5 se observa la FDA del SNR de cada enlace que existe entre el nodo coordinador y los nodos sensores. Esta grafica ayuda a ver la probabilidad que existe de que el SNR tome cierto valor. Sabiendo que la mínima relación señal ruido permisible para el diseño es de 3dB, se hallará la probabilidad de que el SNR sea mayor a dicho valor.

$$P(SNR > 3) = 1 - P(SNR \leq 3) = 4.90\%$$

El 4.90% de los 102 enlaces entre el Nodo Coordinador y los nodos sensores tienen un SNR mayor a 3dB. Es decir, que el Nodo Coordinador solo tendrá conectividad con 5 nodos sensores debido a la eficiencia de la comunicación de los mismos.

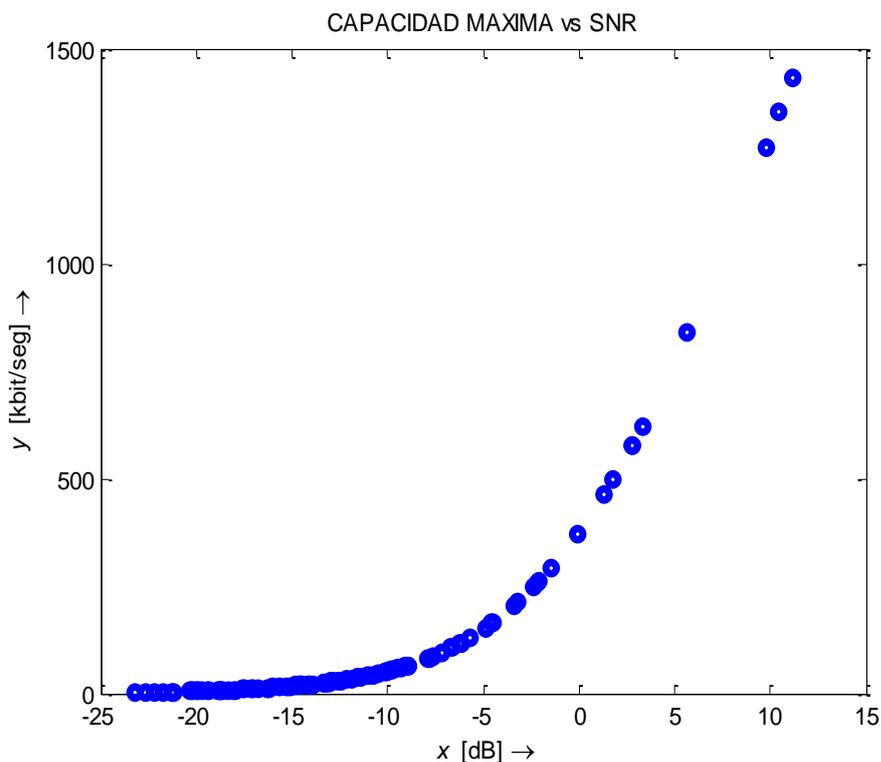


Figura 4.4 Capacidad máxima de los enlaces entre Nodo sensor y nodo coordinador en presencia de ruido medio

En la figura 4.6 se observa la FDA de la potencia de recepción de cada uno de los enlaces entre el nodo Coordinador y los nodos sensores. Esta grafica permite ver la probabilidad de que la potencia de recepción sea mayor a la mínima potencia teórica calculada en el capítulo anterior. Es decir:

$$P(P_{rx} > 85.5) = 1 - P(P_{rx} \leq 85.5)$$

$$P(P_{rx} > 85.5) = 0.8\%$$

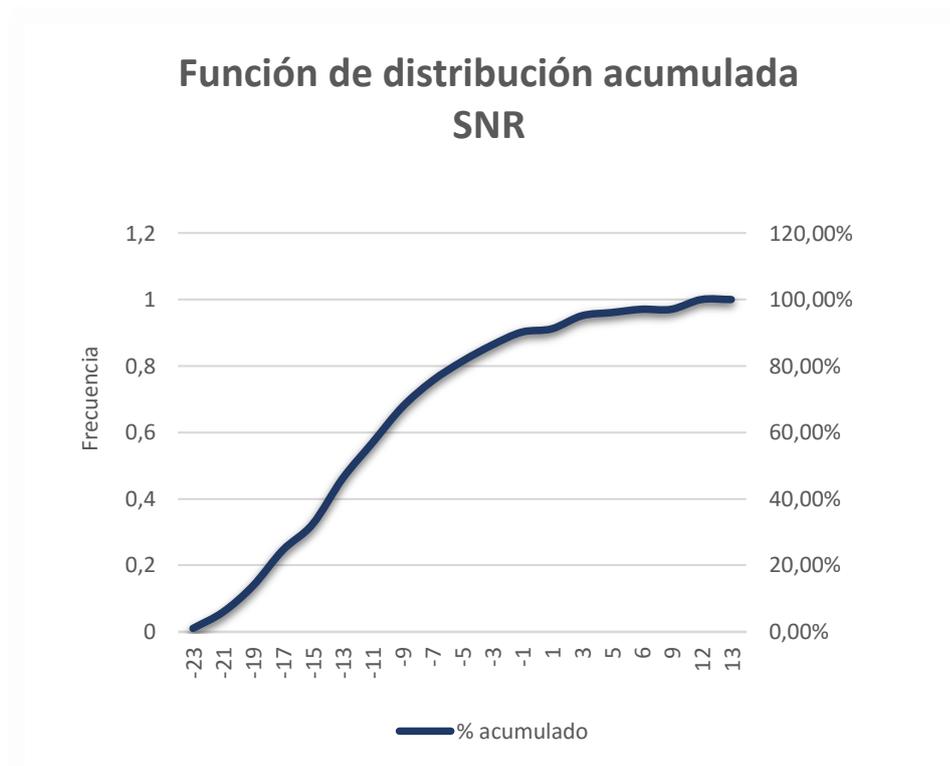


Figura 4.5 Función de distribución acumulada del SNR del Nodo coordinador a los Nodos sensores en presencia de ruido medio

Tan solo el 0.8% de los enlaces existentes entre el nodo Coordinador y los nodos sensores tienen una potencia de recepción mayor al mínimo teórico. Tan solo 1 enlace tiene una potencia de recepción mayor o igual a la mínima establecida teóricamente.

Si se observa con cautela los resultados obtenidos en función del SNR, existen 5 enlaces con relación señal ruido mayor al mínimo permisible, pero en los resultados en función de la potencia de ruido tan solo 1 enlace tiene una potencia mayor a la mínima que se recibe sin problemas.

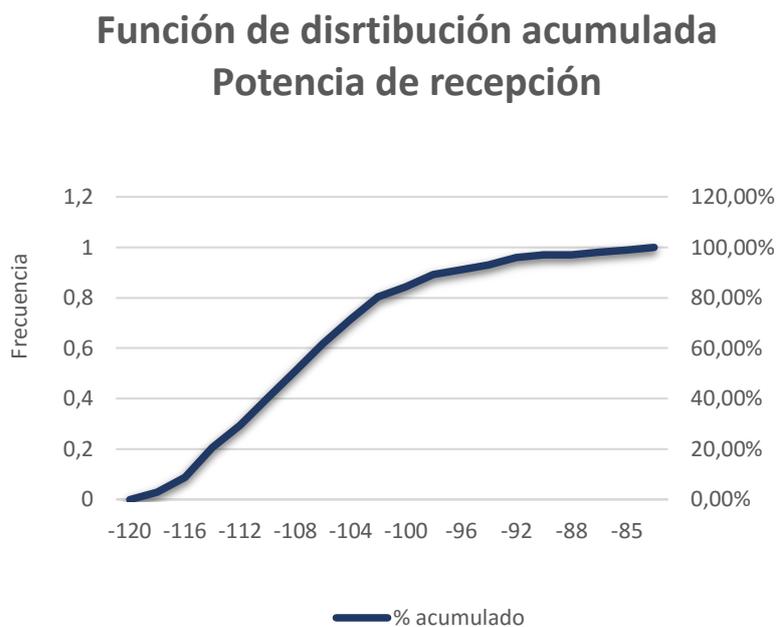


Figura 4.6 Función de distribución acumulada de la potencia de recepción del nodo Coordinador a los Nodos sensores

Esto se debe que los 4 enlaces restantes tienen potencias menores en milésimas, y como el FDA se lo ha realizado con una clase de números enteros, no se observa con precisión estos valores.

Hay que recalcar que la simulación se la ha hecho con ruido de potencia media, pero que pasaría si la potencia de ruido aumentara. Es necesario encontrar la máxima potencia de ruido que tolera la red.

Si la potencia de ruido disminuye, la red no presentaría ningún inconveniente debido a que el SNR incrementaría y se tendrían más conexiones posibles para el nodo coordinador y para los nodos sensores.

4.3 Variación del escenario

Para encontrar la máxima potencia de ruido que tolerará la red diseñada, se variará la misma hasta que por lo menos un nodo quede sin conexión. Se hace esto para ver la reacción de la red con el incremento del ruido.

Para una *Potencia de ruido = -92 dBm*

En la Figura 4.7 se observa el comportamiento de la red en presencia de ruido con potencia de -92 dBm. Si se hace una pequeña comparación grafica con el caso anterior, se observa que al aumentar la potencia del ruido existen menos enlaces entre cada nodo con sus nodos adyacentes.

En el caso específico del nodo coordinador, se observa que el número de enlaces directos disminuyó a 3.

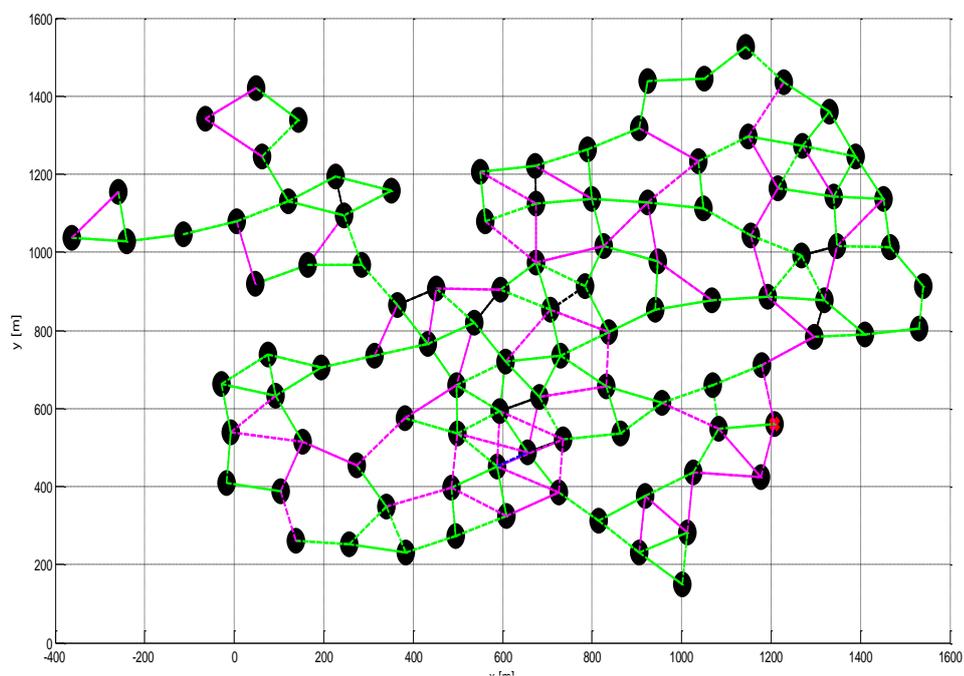


Figura 4.7 Plano dimensional de la distribución de la WSN en presencia de ruido con potencia de -92 dBm

Anteriormente se mencionó que el SNR disminuyó y a razón de esto algunos enlaces quedaron ineficientes. La inestabilidad de dichos enlaces es notable en la Figura 4.8 en donde se observa la variación de la capacidad máxima en función de la variación del SNR. Los 3 enlaces que hay entre los nodos sensores y el nodo coordinador tienen una capacidad máxima mayor a 700 Kbit/s, en comparación con la capacidad de los enlaces del caso anterior, ha disminuido.

En la Figura 4.9 se observa que la distancia entre los nodos sensores y el nodo coordinador con SNR mayor a 3 dB es menor a los 200m. esto es debido al alcance teórico calculado en el capítulo anterior. hay que enfatizar que los módulos de radio vienen con alcances establecidos, pero considerando que existe línea de vista entre transmisor y receptor.

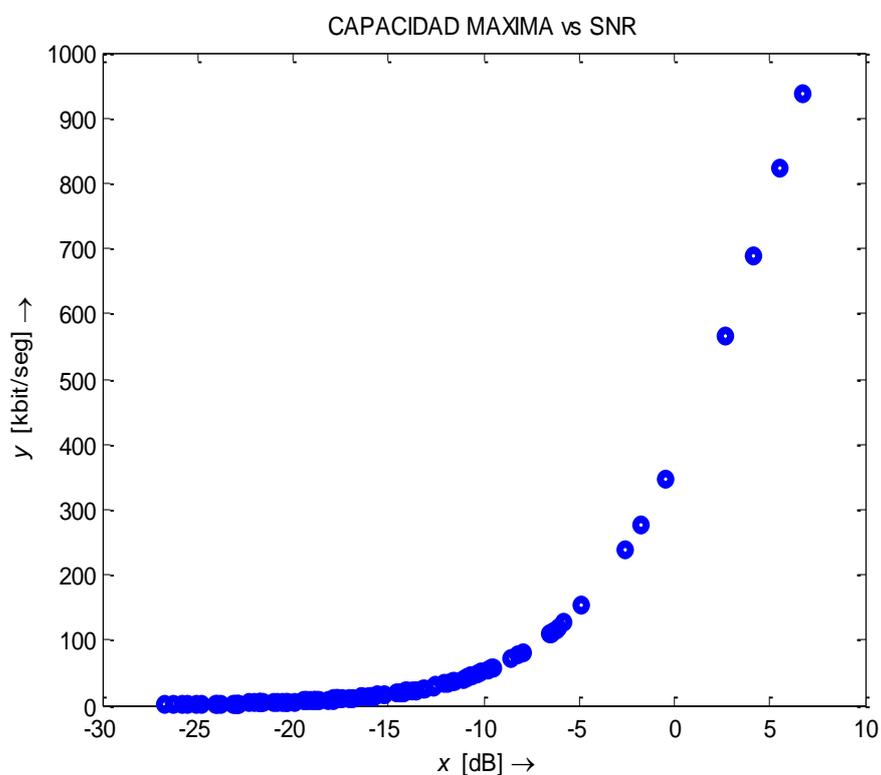


Figura 4.8 Capacidad máxima de los enlaces entre Nodo sensor y nodo coordinador WSN en presencia de ruido con potencia de -92 dBm

Para el escenario en cuestión es muy complicado afirmar que dicho alcance es el real, debido a la presencia de vegetación abundante.

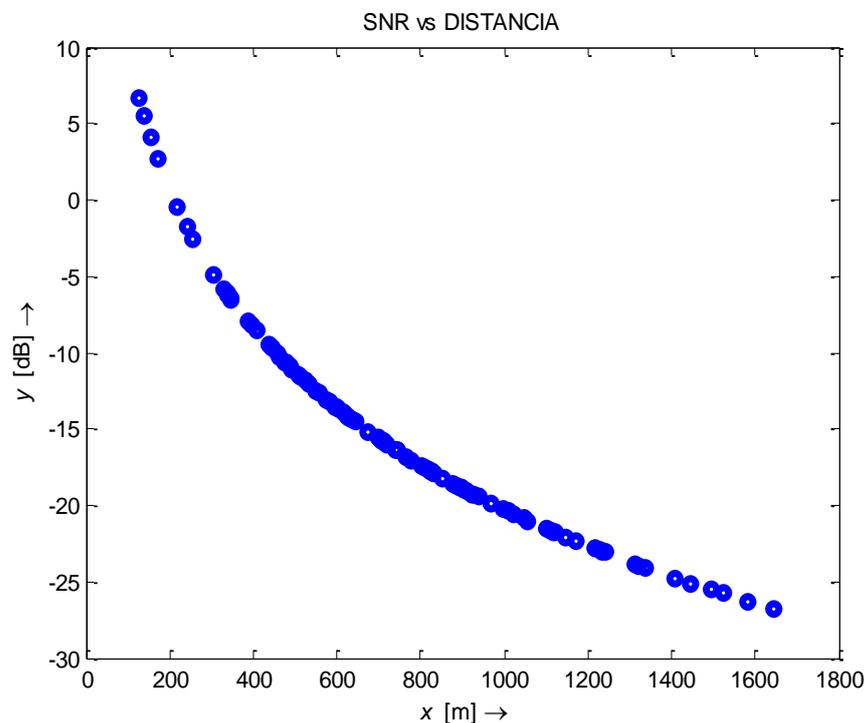


Figura 4.3 Variación del SNR en función de la distancia WSN en presencia de ruido con potencia de -92 dBm

Para una **Potencia de ruido = -90dBm**

En la Figura 4.10 se puede observar la conectividad de la red en presencia de la potencia de ruido establecida. Cada nodo tiene por lo menos un camino para que la información llegue a su destino, es decir ningún nodo queda sin conexión.

Gráficamente, se puede concluir que, al aumentar la potencia de ruido, la conectividad entre algunos nodos se ve afectada. Esto no influye a la eficiencia de la red en general ya que ningún nodo queda aislado. Para comparar la eficiencia de la red con el caso anterior se hallará la FDA del SNR y de la Potencia de recepción para determinar matemáticamente la afectación sobre la red.

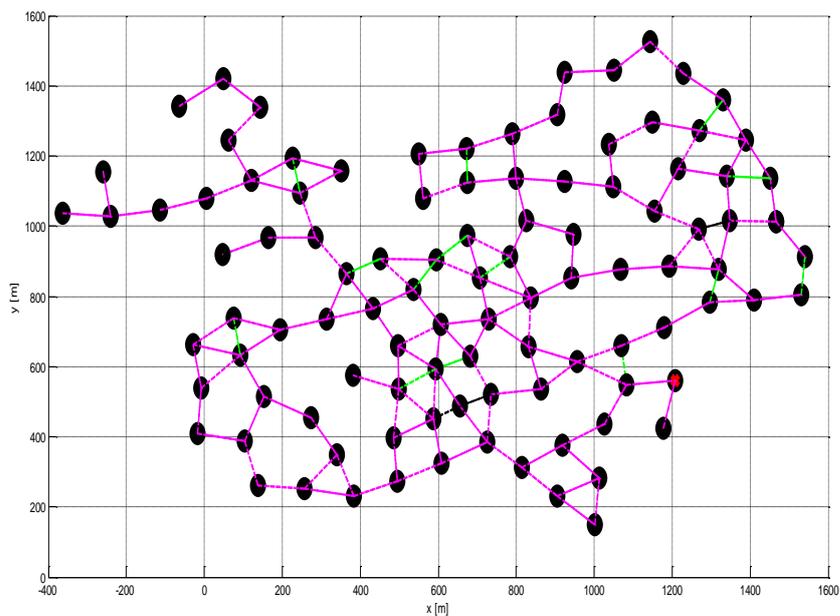


Figura 4.10 Plano dimensional de la red en presencia de ruido con potencia de -90dBm

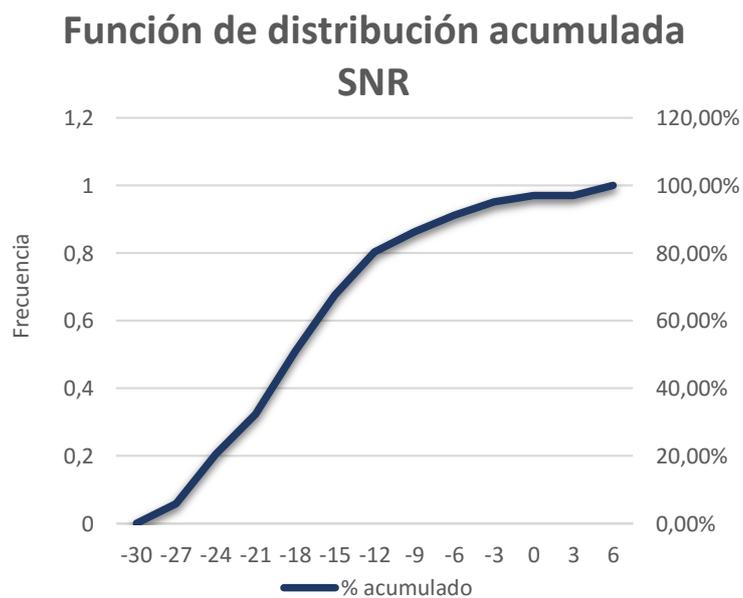


Figura 4.11 Función de distribución acumulada del SNR del Nodo coordinador a los Nodos sensores en presencia de ruido con potencia de -90 dBm

$$P(SNR > 3) = 1 - P(SNR \leq 3) = 1.94\%$$

La red en presencia de ruido con potencia de -90 dBm, presenta aproximadamente 2 enlaces con relación señal ruido mayor al mínimo permisible, demostrando matemáticamente lo que se observó gráficamente.

Si se hace una comparación con el caso anterior, se puede afirmar que a mayor potencia de ruido disminuye la conexión directa entre nodo sensor y nodo coordinador. La Figura 4.12 demuestra gráficamente el número de nodos con un SNR permisible para una comunicación eficiente.

La capacidad máxima del enlace y el SNR son directamente proporcionales. La Figura 4.13 permite comprobar esto con los resultados obtenidos de la simulación de la red en presencia de ruido con potencia de -90dBm. En comparación con el caso anterior la capacidad es mayor a 500 kbit/s, es decir

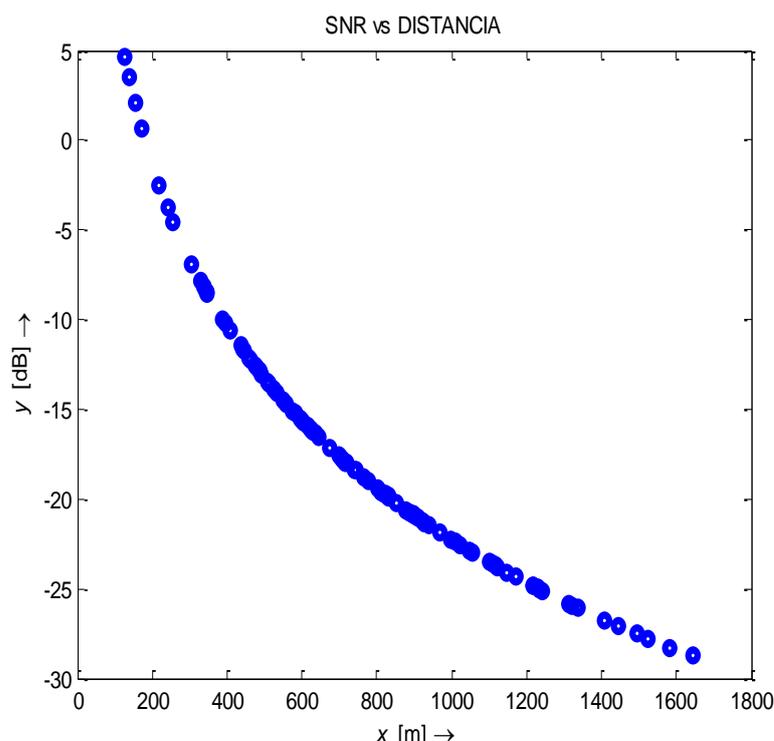


Figura 4.12 Variación del SNR en función de la distancia en presencia de ruido con potencia de -90 dBm

que para una buena transmisión la velocidad tiene que ser menor a este valor.

Debido a la utilización del estándar 802.15.4 es que se pueden tener estas velocidades pequeñas, ya que la red solo transmite pequeños paquetes de datos. la red es considerada como una WPAN de bajo costo.

Se concluye que la red en presencia de ruido con potencia de -90dBm sigue teniendo eficiencia en cuanto a conectividad. Toda la información transmitida mediante cada enlace existente podrá llegar a su destino de manera efectiva.

Para una **Potencia de ruido = -89dBm**

En la Figura 4.14 ya se observan problemas en la red, debido a que dos nodos quedan aislados, es decir que el área designada a cubrir por cada uno de ellos queda sin ser monitoreada y esto implica que, si existe una zona de riesgo justo en ese sector, no podrá ser detectada en el tiempo oportuno para prevenir el incendio.

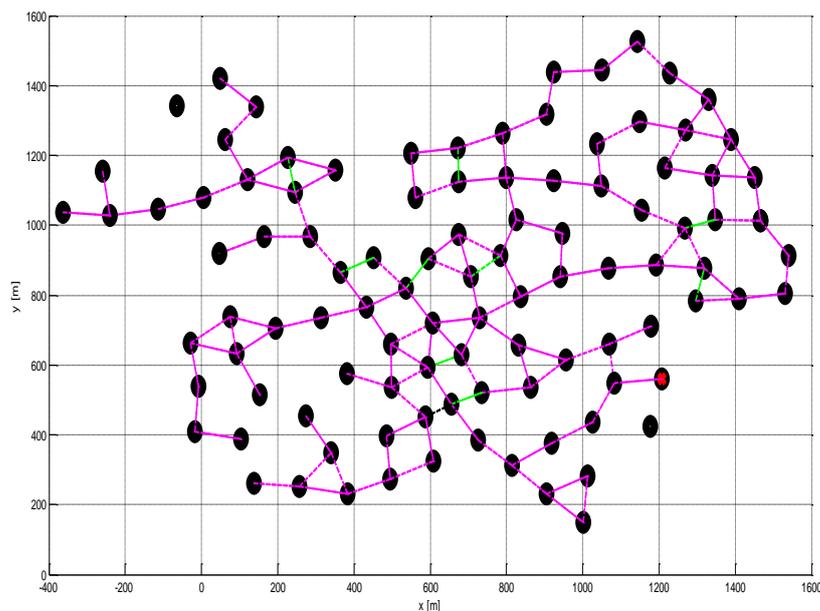


Figura 4.13 Plano dimensional de la red en presencia de ruido con potencia de -89dBm

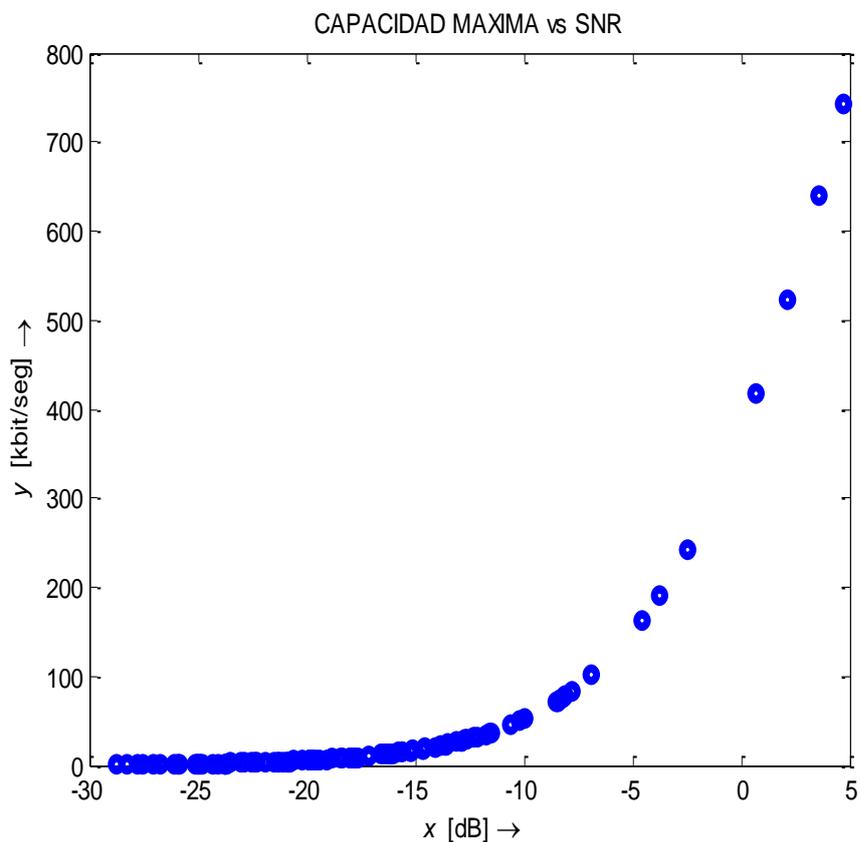


Figura 4.4 Variación de la capacidad máxima en función del SNR en presencia de ruido con potencia de -90 dBm

En la Figura 4.15 podemos observar la FDA del SNR de los enlaces entre nodo coordinador y los nodos sensores en presencia de ruido con potencia de -89dBm. Si hallamos la probabilidad de que el SNR sea mayor a 3 dB no vamos a encontrar mucha diferencia con en caso anterior, ya que gráficamente podemos determinar que solo 1 nodo tiene comunicación directa con el nodo coordinador. Pero para este caso nos enfocaremos en el análisis del nodo que queda aislado.

Función de distribución acumulada SNR

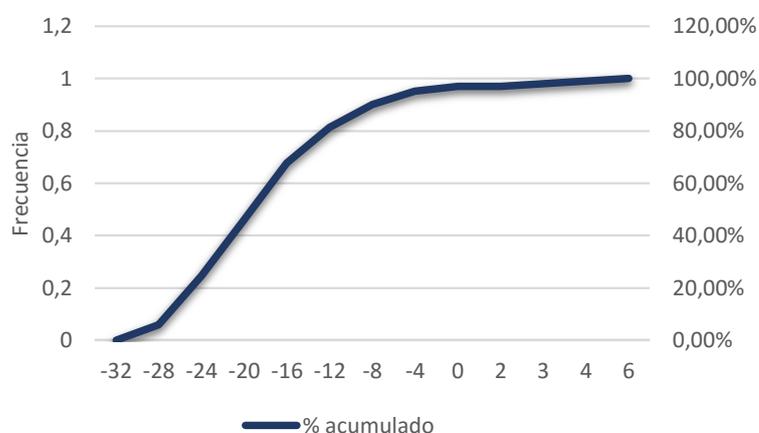


Figura 4.15 Función de distribución acumulada del SNR del Nodo coordinador a los Nodos sensores en presencia de ruido con potencia de -89dBm

El nodo 18 (Punto amarillo) se encuentra aislado según la Figura 4.16. Es decir, que este nodo no tiene comunicación con ninguno de sus nodos adyacentes.

En la Figura 4.17 se observa el FDA del SNR de los enlaces entre el nodo 18 y sus nodos adyacentes. La $P(SNR > 3) = 0$, es decir que ningún enlace entre el nodo 18 y sus nodos adyacentes puede ser posible debido a que su relación señal ruido es menor al mínimo que permite el estándar.

Para este caso, toda la información que transmita el nodo 18 en presencia de ruido con potencia de -89 dBm no podrá ser interpretada por ningún nodo sensor. Si la potencia de ruido incrementa, existirán más nodos aislados; esto le quita la eficiencia a nuestra red, por lo que podemos concluir que la máxima potencia de ruido que tolera nuestra red es de -90 dBm.

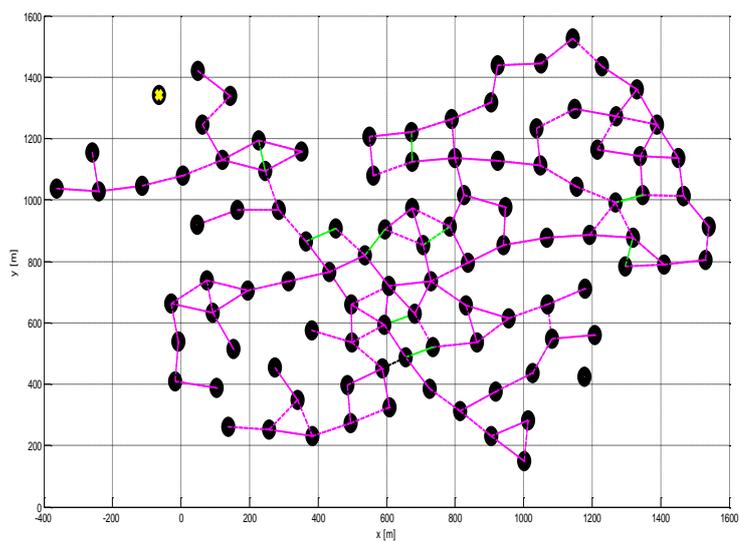


Figura 4.16 Plano dimensiona de la WSN es presencia de ruido con potencia de -89 dBm

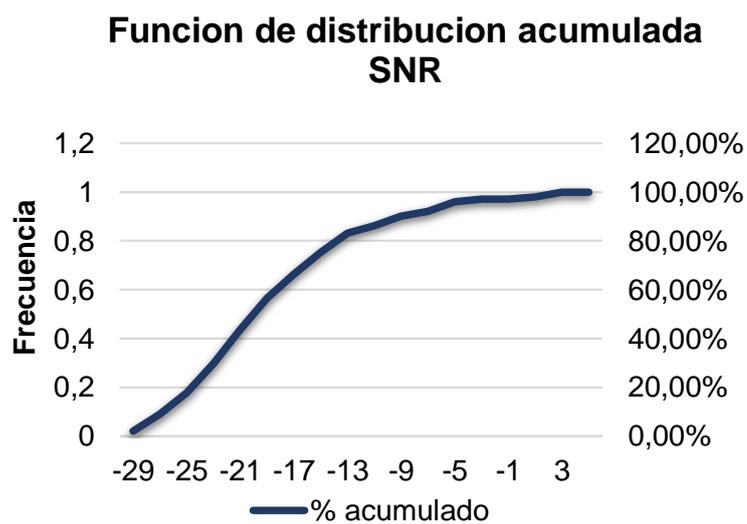


Figura 4.17 Función de distribución acumulada del SNR del Nodo 18 a los Nodos adyacentes en presencia de ruido con potencia de -89dBm

Una forma de aumentar este umbral, es disminuyendo el radio de cobertura de cada nodo. Lo que implicaría la utilización de más nodos sensores al momento de rediseñar la red.

Para el diseño propuesto se dejará el alcance teórico calculado debido a que el umbral determinado mediante la simulación es mayor a la potencia media que se encuentra en sectores sub urbanos

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el análisis teórico sobre factores climatológicos preponderantes en incendios forestales se concluye que las variables a ser monitoreadas por la WSN son: Temperatura, humedad, CO y CO₂. Estas variables inciden en la probabilidad de que ocurra un incendio forestal, por lo que es importante un modelamiento estadístico de su comportamiento en el bosque protector Cerro Colorado.

El escenario en donde se desarrolló el diseño fue elegido debido a la afectación que ha tenido en los últimos años a razón de los incendios forestales. El estudio de campo permitió obtener información relevante sobre el escenario, tal como el número de hectáreas que comprende el bosque, topografía y tipo de sector.

Para el caso específico del proyecto, se ha hecho uso de la estructura más básica de una WSN, la cual está conformada por nodos sensores, un nodo controlador, y una estación base. Dicha estructura permite monitorear un área determinada según la aplicación.

Se ha determinado el uso del estándar 802.15.4 para el diseño propuesto debido al bajo costo que implica su instalación. Además, es un estándar específicamente para monitoreo debido a su baja transferencia de datos y al bajo consumo de energía. Este estándar permite trabajar con varias topologías, pero debido al área considerable del bosque se ha concluido que, para que la comunicación inalámbrica en la red sea eficiente es necesario usar una topología punto a multipunto.

Para el diseño de la WSN se ha decidido trabajar con dispositivos electrónicos de Libelium. Para el nodo sensor se usó las especificaciones del Waspmote debido a la capacidad de adaptación en cuanto a sensores, módulos de radio y fuentes de

energía. Además, puede trabajar en modo de hibernación para ahorrar batería. Debido a que la información receptada por el nodo coordinador requiere ser subida a Internet, se determinó el uso del Gateway Meshlium. Este dispositivo permite la comunicación inalámbrica con el nodo coordinador usando el mismo módulo de radio y su salida es por un puerto Ethernet.

Para el análisis matemático se usó las especificaciones de los equipos seleccionados y los parámetros del estándar. Para un diseño eficiente se realizó el presupuesto de enlace para la comunicación entre los nodos sensores con el nodo coordinador, y entre el nodo coordinador y el Gateway, usando el modelo de propagación "Multipath fading". El alcance máximo de cada mota es de aproximadamente 125 m es un escenario optimista. La distancia máxima de separación entre el nodo coordinador y el Gateway debe de ser aproximadamente 4km.

El diseño propuesto consta de 101 nodos sensores y 1 nodo coordinador, con radio de cobertura de 125m, cada ubicación ha sido elegida considerando el alcance teórico calculado.

Al evaluar la eficiencia de la red en un escenario optimista, se pudo observar la reacción de la misma en presencia de ruido medio. Se concluye que la red es eficiente debido a que cada nodo sensor tiene por lo menos un camino para enviar su información hacia el nodo coordinador. Se ha asegurado la conectividad de la red mediante un correcto análisis de propagación para establecer parámetros esenciales, tales como Potencia de recepción, relación señal ruido permitida del estándar, las cuales que determinan una comunicación estable y libre de ruido.

Mediante la simulación de la red, se pudo determinar la máxima potencia de recepción que tolera la red diseñada. Es relevante establecer este valor ya que en el escenario real dicha potencia varía aleatoriamente debido al uso de la frecuencia central ya que es una banda ISM. La máxima potencia de ruido que tolera la red

diseñada en un escenario optimista es de -90 dB. Si hacemos una comparación con la potencia de ruido media que se determinó para una zona suburbana de la ciudad de Guayaquil, la máxima potencia que tolera la red es mayor a dicha potencia media, a razón de esto podemos concluir que el valor hallado brinda la eficiencia que necesita la red en cuanto a conectividad.

Se recomienda formar una base de datos para la red, para poder modelar estadísticamente el comportamiento de las variables que inciden en la probabilidad de que ocurra un incendio forestal. Así, se podría correlacionar dichas variables y calcular un índice de riesgo, esto permitiría alertar de forma más acertada.

Se recomienda, por medio de un software, compatible con los dispositivos electrónicos a utilizar crear una interface que muestre gráficamente el escenario y el foco de incendio, donde los sensores se activaron.

Se recomienda un estudio estadístico del Bosque Protector Cerro el Colorado respecto a las variables a monitorear, ya que por medio del mismo se podrá tener un entendimiento con más exactitud sobre el comportamiento del incendio y de su propagación.

Es recomendable que se efectúen actualizaciones del firmware de los Xbee, para de este modo tener óptimo trabajo en sus funciones y no tener inconvenientes al momento de su configuración, aprovechando al cien por ciento su funcionalidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Bermúdez, R. Casado, E. M. García, Á. Gómez, F. J. Quiles, J. Reyes y Ruiz-Gallardo, Empleo de una red de sensores en el reajuste de modelos de comportamiento del fuego en incendios forestales, *Wildfire* , 2007.
- [2] M. Castillo, P. Pedernera y E. Peña, Incendios forestales y medio ambiente, Santiago-Chile: Laboratorio de Incendios Forestales, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, 2003.
- [3] G. Barrantes, H. Chaves y V. M., El Bosque en el Ecuador - Una visión transformada para el desarrollo y la conservación, Quito, Ecuador: Comafors, 2001.
- [4] R. Whelan, «The ecology of fire,» de *The ecology of fire*, Cambridge, EE.UU., Cambridge University Press., 1995, p. 346 p..
- [5] S. P. A. y R. L. Pyne, «Introduction to wildland fire.,» Nueva York, EE.UU., 2a.ed. Wiley, 1996, p. 769 p..
- [6] Wouters y M. Branch, «Developing fire management planning in Victoria: A case study from the Grampians.,» de *Fire Research Report No. 39* , Australia, Fire Management, 1993.
- [7] M. C. Soto, Incendios Forestales y Medio Ambiente, Santiago de Chile: Universidad De Chile, 2007.
- [8] C. N. d. R. Hídricos, «C.N.R.H.: Consejo Nacional de Recursos Hídricos,» 2002.
- [9] M. d. Ambiente, «Plan de Contingencia de Incendios Forestales buscar prevenir, mitigar y controlar este fenómeno natural,» MAE, Quito, 2014.
- [10] A. A. Alberto, A.-P. Diego, E. P. Jennyfe y H. P. Carlos, «Evaluación de una red de Sensores Inalámbrica para detección de Incendios Forestales,» *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, vol. 28, nº 3, pp. 115-130, 2015.
- [11] C. Varela y L. Domínguez, Redes Inalámbricas, Valladolid-España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática Universidad de Valladolid, 2002.

- [12] R. P. Areny, *Sensores y acondicionadores de señal.*, Marcombo, 2004.
- [13] N. Aakvaag y J.-E. Frey, *Redes de sensores inalámbricos*, Noruega: ABB Corporate Research, 2005.
- [14] G. Julio, *Diseño de índices de riesgo de incendios forestales para Chile*, Santiago-Chile: Bosque, 59-72, 1990.
- [15] M. Bahrepour, N. Meratnia y P. Havinga, *AUTOMATIC FIRE DETECTION: A SURVEY FROM WIRELESS SENSOR NETWORK PERSPECTIVE*, Twente, 2010.
- [16] G. Tagle, L. Schwendenmann, J. J. Pérez y W. Himmelsbach., *Reconstrucción del historial de incendios y estructura forestal en bosques mixtos de pino-encino en la Sierra Madre Oriental.*, Madera y Bosques , 2007.
- [17] A. RIFà y M. Castellnou, *El modelo de extinción de incendios forestales catalan.*, Sevilla-España, 2007.
- [18] Mataix-Solera y A. Cerdà, *Incendios forestales en España. Ecosistemas terrestres y suelos.*, Madris-España, 2009.
- [19] M. M. Zanjireh, A. Shahrabi y H. Larijani, «IEEE Explorer,» 23 Marzo 2013. [En línea]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/6550437/?tp=&arnumber=6550437&url=http:%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6550437. [Último acceso: 1 agosto 2016].
- [20] I. d. I. E. y. Electrónica, *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY), Specification for Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN'S, 802.15.4a-2006*, New York: IEEE, pag 5-19, 2006.
- [21] A. MONTOYA y D. OVALLE, *Evaluación del Desempeño en Redes Inalámbricas de Sensores Mejoradas con Agentes Móviles*, Bogotá-Colombia: Revista EIA; 1ra ed; Pp. 151-166., 2012.
- [22] R. WIGHTMAN y M. LABRADOR, *¿Reducir el Rango de Comunicación o apagar nodos?: una evaluación inicial de estrategias para control de topología en redes inalámbricas de sensores*, Bogotá-Colombia: s.e. ;1ra ed; Pp. 66-88, 2010.

- [23] O. J. E. (s.f.), «The Last Lab Project,» 12 Mayo 2014. [En línea]. Available: <http://thelastlabproject.blogspot.com/2010/12/clasificacion-de-lossensores.html>.
- [24] M. 2, «Mica 2, datasheet,» [En línea]. Available: <https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>.
- [25] Intel, «Datasheet intel mote 2,» [En línea]. Available: http://graphics.stanford.edu/projects/AHPCRC_TA3/ta3a/resources/imote2-ds-rev2.1.pdf.
- [26] Libelium, «Datasheet Waspote,» 2009. [En línea]. Available: http://www.libelium.com/v11-files/documentation/waspote/waspote-technical_guide_eng.pdf.
- [27] M. Fernández, J. Ordieres, J. Martinez, A. González y A. Pernía, Wsn Teoría Y Aplicación Práctica, España: Universidad de la Rioja, 2009.
- [28] IEEE, «IEEE 802.15 WPAN Task Group,» [En línea]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.
- [29] I. D. I. E. Y. ELECTRÓNICA, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY), Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 802.15.4, New York – EEUU: IEEE. 2da ed.,pp 5-19, 2006..
- [30] A. León García, Redes de comunicación: conceptos fundamentales y arquitecturas básicas, España: McGraw-Hill, 2001.
- [31] Zigbee, «Zigbee,» [En línea]. Available: www.zigbee.org.
- [32] Libelium, «Libelium Waspote Zigbee,» [En línea]. Available: http://www.libelium.com/uploads/2013/02/waspote-zigbee-networking_guide.pdf.
- [33] R. Faludi, Building Wireless Sensor Networks: with ZigBee, XBee, Arduino and Processing., s.l. : O'Reilly Media.
- [34] D. INTERNATIONAL, XBee/XBee-PRO RF Modules, Product Manual v1.xEx - 802.15.4 Protocol, Minnesota-EEUU., Ed. Digi: Digi, 1ra ed., 4-6, 2009.

- [35] D. Corporation, «Digi,» [En línea]. Available: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_P.pdf.
- [36] M. A. WEISSBERGER, « An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by foliage, ESD-TR-81-101, Electromagnetic Compatibility Analysis Center,» 1981.
- [37] P. P. P. E. CASTILLO M., Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global., Revista ambiente y desarrollo de CIPMA, 2003.
- [38] J. S. G., «Teoría de Fuego.,» 2014. [En línea]. Available: disponible en el sitio: <http://www.slideshare.net/guestb2169cc/teoria-del-fuego>.
- [39] CONAF., Incendios forestales en Chile., Santiago: <http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/> , 2014 .
- [40] P. J. G., Incendios forestales, una inroducción a la teoría del fuego, México: Catarata y CSIC, 2012.
- [41] R. Correa, «Ministerio del Ambiente,» ddd, 1 Agosto 2014. [En línea]. Available: www.mae.gob.edu.ec. [Último acceso: 1 Agosto 2016].
- [42] Libelium, «Wasmote Zigbee,» [En línea]. Available: http://www.libelium.com/uploads/2013/02/wasmote-zigbee-networking_guide.pdf.
- [43] Libelium, «WASPMOTE,» [En línea]. Available: http://www.libelium.com/v11-files/documentation/wasmote/wasmote-technical_guide_eng.pdf.
- [44] H. N. Norton, “Sensores y Analizadores”., G&G, 1984.
- [45] Libelium, «Meshlium,» [En línea]. Available: <http://www.libelium.com/development/meshlium>.
- [46] G. Galindo, «lincendios forestales como se producen como evitarlos y que efectos genera en el ecosistema,» Ecuforestal, Quito-Ecuador, 2013.
- [47] Y. G. Y. C. G. J. Y. L. J. A. Liu, novel accurate forest fire detection system using wireless sensor networks. In: Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN),, Seventh International Conference, 2011.

- [48] F. Lopez y F. Leandro, 2011. [En línea]. Available: <https://sx-detx.wikispaces.com/ZIGBEE>.

- [49] Libelium, «Placa de GASES PRO,» [En línea]. Available: http://www.libelium.com/downloads/documentation/gases_sensor_board_pro.pdf.

- [50] Libelium, «Placa de Sensores,» [En línea]. Available: http://www.libelium.com/v11-files/documentation/waspmote/waspmote-datasheet_eng.pdf.

ANEXOS

ANEXO A: Tabla de coordenadas de los nodos

# Nodo	X	Y	Coordenada Final X	Coordenada Final Y	Altura a nivel del piso	Coordenada Final Z
NC	622416.384	9770201.166	1290.681	647.686	14	17
1	622333.5197	9770112.474	1207.8167	558.994	17	20
2	622194.5559	9770213.297	1068.8529	659.817	21	24
3	622304.43	9770263.23	1178.727	709.75	25	28
4	622318.59	9770440.94	1192.887	887.46	27	30
5	622445.35	9770430.11	1319.647	876.63	22	25
6	622535.19	9770343.1	1409.487	789.62	22	25
7	622082.53	9770167.68	956.827	614.2	21	24
8	622208.02	9770100.36	1082.317	546.88	13	16
9	622304.12	9769977.97	1178.417	424.49	17	20
10	622657.05	9770358.82	1531.347	805.34	29	32
11	622666.71	9770466.87	1541.007	913.39	9	12
12	622592.6	9770567.09	1466.897	1013.61	12	15
13	622472.98	9770569.46	1347.277	1015.98	22	25
14	622192.88	9770430.9	1067.177	877.42	23	26
15	622421.65	9770336.53	1295.947	783.05	11	14
16	622067.78	9770404.94	942.077	851.46	31	34
17	621962.03	9770348.94	836.327	795.46	22	25
18	622152.62	9769989.5	1026.917	436.02	15	18
19	622043.87	9769928.78	918.167	375.3	16	19
20	622138.18	9769835.09	1012.477	281.61	11	14
21	622127.66	9769703.71	1001.957	150.23	13	16
22	622031.89	9769784.18	906.187	230.7	23	26
23	621940.98	9769864.65	815.277	311.17	31	34
24	621860.27	9770073.19	734.567	519.71	31	34
25	621851.28	9769939.36	725.577	385.88	33	36
26	621733.71	9769876.83	608.007	323.35	9	12
27	621621.52	9769828.06	495.817	274.58	20	23
28	621508.51	9769785.55	382.807	232.07	15	18
29	621382.79	9769805.96	257.087	252.48	15	18
30	621264.2997	9769815.951	138.5967	262.471	20	23
31	621465.34	9769902.61	339.637	349.13	30	33

32	621611.28	9769951.24	485.577	397.76	22	25
33	621400.12	9770008.62	274.417	455.14	45	48
34	621781	9770040.98	655.297	487.5	18	21
35	621713.73	9770005.09	588.027	451.61	17	20
36	621957.78	9770211.59	832.077	658.11	19	22
37	621855.89	9770287.55	730.187	734.07	25	28
38	621807.43	9770184.36	681.727	630.88	19	22
39	621718.66	9770147.71	592.957	594.23	17	20
40	621624	9770090.01	498.297	536.53	33	36
41	621507.04	9770127.23	381.337	573.75	34	37
42	621623.63	9770213.23	497.927	659.75	20	23
43	621731.75	9770274.57	606.047	721.09	21	24
44	622072.14	9770530.1	946.437	976.62	37	40
45	622576.42	9770688.86	1450.717	1135.38	12	15
46	622515.06	9770800.14	1389.357	1246.66	35	38
47	622456.01	9770913.77	1330.307	1360.29	57	60
48	622353.86	9770989.05	1228.157	1435.57	79	82
49	622270.01	9771079.12	1144.307	1525.64	61	64
50	622175.89	9770996.88	1050.187	1443.4	97	100
51	622049.21	9770993.25	923.507	1439.77	87	90
52	622030.42	9770870.86	904.717	1317.38	86	89
53	622393.07	9770544.34	1267.367	990.86	30	33
54	622465.12	9770695.68	1339.417	1142.2	28	31
55	622341.12	9770717.43	1215.417	1163.95	28	31
56	622395.85	9770825.33	1270.147	1271.85	42	45
57	622273.99	9770850.56	1148.287	1297.08	85	88
58	622163.21	9770788.1	1037.507	1234.62	59	62
59	622279.97	9770595.24	1154.267	1041.76	36	39
60	622174.64	9770665.45	1048.937	1111.97	41	44
61	622050.24	9770680.3	924.537	1126.82	52	55
62	621914.9	9770816.6	789.197	1263.12	86	89
63	621951.57	9770570.1	825.867	1016.62	53	56
64	621910.69	9770466.36	784.987	912.88	24	27
65	621800.94	9770527.72	675.237	974.24	35	38
66	621799.15	9770774.55	673.447	1221.07	67	70
67	621926.08	9770689.47	800.377	1135.99	79	82
68	621799.67	9770679	673.967	1125.52	56	59
69	621675.48	9770758.96	549.777	1205.48	69	72

70	621832.5	9770406.57	706.797	853.09	24	27
71	621720.38	9770458.22	594.677	904.74	38	41
72	621687.59	9770632.68	561.887	1079.2	42	45
73	621663.31	9770374.45	537.607	820.97	28	31
74	621578.07	9770460.07	452.367	906.59	39	42
75	621558.53	9770318.38	432.827	764.9	25	28
76	621489.95	9770419.34	364.247	865.86	43	46
77	621477.43	9770710.74	351.727	1157.26	67	70
78	621352.97	9770747.97	227.267	1194.49	68	71
79	621372.18	9770649	246.477	1095.52	50	53
80	621411.31	9770522.43	285.607	968.95	44	47
81	621247.28	9770683.14	121.577	1129.66	77	80
82	621289.24	9770521.34	163.537	967.86	43	46
83	621321.15	9770257.27	195.447	703.79	37	40
84	621131.56	9770632.67	5.857	1079.19	68	71
85	621172.39	9770471.88	46.687	918.4	55	58
86	621201.32	9770292.2	75.617	738.72	44	47
87	621217.6	9770184.91	91.897	631.43	57	60
88	621097.9	9770217.61	-27.803	664.13	34	37
89	621011.77	9770598.31	-113.933	1044.83	69	72
90	620884.98	9770581.73	-240.723	1028.25	68	71
91	620762.18	9770591.44	-363.523	1037.96	68	71
92	621278.78	9770068.48	153.077	515	58	61
93	621230.18	9769940.61	104.477	387.13	54	57
94	621117.3	9770093.15	-8.403	539.67	51	54
95	621108.68	9769961.11	-17.023	407.63	38	41
96	620867.32	9770708	-258.383	1154.52	84	87
97	621187.55	9770797.4	61.847	1243.92	86	89
98	621269.45	9770893.74	143.747	1340.26	96	99
99	621173.94	9770974.36	48.237	1420.88	80	83
100	621062.14	9770895.78	-63.563	1342.3	73	76
n23r	621988.77	9770088.49	863.067	535.01	21	24
n76r	621439.79	9770287.86	314.087	734.38	30	33

ANEXO B: Glosario de términos

4-CO-500	Sensor de Monóxido de carbono
ACK	Confirmación de paquete recibido
AD-HOC	Conexión descentralizada
APL	Capa de Aplicación
Backoff	Tiempo de espera aleatorio
Beacon Mode	Modo con Señalización
BME280	Sensor de temperatura y humedad
CCA	Evaluación de Canal
CCmax	Capacidad máxima del canal
CE	Calidad de Enlace
TCP	Control de Transmisión/Protocolo de Internet
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access and Collision Avoidance
DE	Detección de energía
DCL	Detección del Canal Libre
DLL	Capa de Enlace de datos
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FD	Dispositivos de funcionalidad reducida
FDA	Función de distribución acumulada
FFD	Dispositivos de funcionalidad completa
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INE20-CO2P	Sensor de Dióxido de carbono
LLC	Control de Enlaces Lógicos
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network (Red de Área Personal)
MAC	Control de acceso al medio
CSMA	Múltiple con Detección de Portadora y Prevención de Colisiones
N-BM	Modo Libre de Transmisión
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open System Interconnection (Interconexión de Sistema Abierto)
PSDU	Physical Service Data Unit
UV	Rayos ultra violetas
RED	Random Early Detection
RF	Radiofrecuencias
RP-SMA	Reverse Polarity Sub Miniature Version A
Slot Times	Tiempos de Ranuras
SNR	Relación Señal-Ruido
SP	Sensado de Portadora
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
TCP IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UDP	User Datagram Protocol

UHF	Ultra High Frequency
VCC	Voltaje de Corriente Continua
WIFI	Wireless Fidelity (Fidelidad Inalámbrica)
WIMAX	Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas
WLAN	Wireless Local Area Network (Red Inalámbrica de Área Local)
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network (Red de Sensores Inalámbrica)
ZDO	ZigBee Device Object