



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

**“IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UNA  
RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA LA GESTIÓN DE  
APARCAMIENTOS EN ZONAS ABIERTAS”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del título de:

**MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

**ERNESTO ERAZO ENRÍQUEZ**

**VÍCTOR HUGO SOLÓRZANO GRACIA**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por ser nuestro pilar fundamental para la culminación de este proyecto, a cada maestro que hizo parte de este proceso integral de formación, al Ingeniero Ronald Criollo que estuvo presente en el inicio de la maestría y que amplió nuestros conocimientos de tecnología, y ahora como tutor guiándonos para culminar con éxito el trabajo presentado.

## DEDICATORIA

A DIOS por todo su amor, misericordia infinita y por estar presente en nuestras vidas. A mi esposa e hijas por todo el soporte que me brindaron durante el desarrollo de este proyecto y porque siempre puedo contar con sus consejos y la ayuda incondicional de ellas.

A mis padres y a todos mis familiares y amigos, porque han sido parte de mi formación, y me han permitido tener una vida grata.

Ernesto

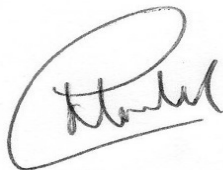
A DIOS TODO PODEROSO que siempre escucha nuestras incansables suplicas, por guiarme y cuidarme durante este recorrido, son muchas metas las que he logrado alcanzar con fe y esperanza, siempre serás mi luz y apoyo.

A mis padres Ing. Hugo Solórzano Plaza y Dra. Gracia Gamez, por apoyarme siempre y llenarme de amor infinito, amor que me dio la confianza de seguir hacia adelante sin titubear, su apoyo y los valores impartidos de respeto, amistad, sinceridad, sencillez, responsabilidad me ayudaron a enfrentar las metas planteadas hasta así cumplirlas, los amo.

A mi hermana Angie Solórzano Gracia, por ser una mano amiga, por estar siempre en las buenas y las malas y por ser como eres olvidadiza y odiosa pero que amo infinitamente.

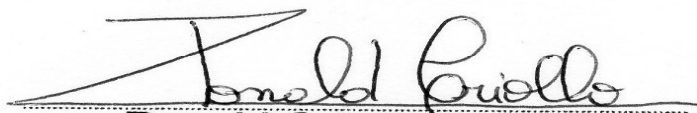
Víctor

**TRIBUNAL DE EVALUACIÓN**



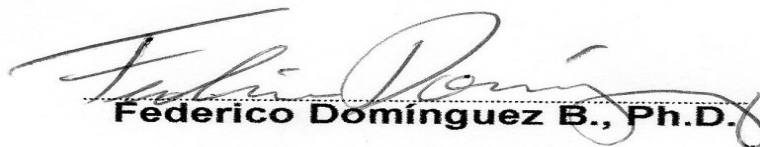
**César Martín M., Ph.D.**

**PRESIDENTE**



**Ronald Criollo B., Msig.**

**DIRECTOR TRABAJO DE TITULACIÓN**



**Federico Domínguez B., Ph.D.**

**MIEMBRO PRINCIPAL**

## 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"



Ernesto Erazo Enríquez



Víctor Hugo Solórzano Gracia

## RESUMEN

En la actualidad debido al crecimiento del parque automotriz en el Ecuador, es necesario contar con algún tipo de sistema que optimice el uso de los espacios destinados al aparcamiento de vehículos en espacios abiertos. Normalmente en espacios públicos se está instalando parquímetros para cobrar una tarifa por el uso del espacio por el tiempo de ocupación, pero no existen indicadores acerca de la ubicación de los espacios disponibles.

Hoy en día podemos observar que, debido al avance de la tecnología, se pueden conseguir cámaras a un bajo costo, las mismas que se están utilizando principalmente como un control disuasivo para temas de seguridad y en parqueos se las utiliza para reconocimiento de las placas de los vehículos. El presente proyecto presenta una alternativa del uso de cámaras para el control de espacios disponibles en espacios abiertos, las mismas que se pueden conectar a dispositivos microcontroladores de bajo costo para conformar una red de nodos sensores, interconectados a través de una red inalámbrica que nos permitan ubicar espacios disponibles de parqueo con mayor rapidez.

Debido a la distancia que existe entre un nodo sensor y el equipo coordinador, el sistema planteado se ve principalmente afectado por el efecto normal de pérdida en el espacio libre de la señal y como los nodos están equipados con cámaras, también se requiere la iluminación adecuada para que el nodo sensor capte las imágenes de tal manera que pueda ser reconocida y procesada para determinar de manera correcta la disponibilidad de un espacio libre.

La propuesta planteada fue probada de manera exitosa durante la etapa de verano en varios sectores de aparcamientos de la ciudad, pero la mayoría de las pruebas fueron realizadas en el parqueo de la FIEC en la ESPOL. A pesar que la propuesta de este trabajo era la de detectar espacios de parqueos disponibles en espacios abiertos, también fue probado con éxito en parqueos ubicados en el interior de edificios.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
CAPÍTULO 1 .....	1
1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....	1
1.1 Descripción del Problema: .....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos: .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Metodología: .....	4
1.5 Limitaciones .....	4
CAPÍTULO 2 .....	5
2 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Red Inalámbrica de Sensores (WSN). .....	5
2.1.1 Características.....	5
2.1.2 Aplicaciones. ....	7
2.1.3 Ventajas y Desventajas de las WSN .....	9
2.2 Estándar Zigbee .....	9
2.2.1 Características.....	9
2.2.2 Arquitectura .....	12
2.2.3 Aplicaciones .....	17
2.2.4 Topologías.....	17
2.2.5 Modos de Trabajo.....	18

2.2.6 Tipos de Dispositivos.....	19
2.3 XCTU .....	25
2.4 Sensores CMOS .....	25
2.4.1 Características.....	25
2.4.2 Tipos.....	25
2.5 Minicomputadora Raspberry Pi .....	26
2.5.1 Características.....	26
2.5.2 Arquitectura .....	27
2.5.3 Aplicaciones .....	27
2.6 Placa Arduino.....	28
2.6.1 Características.....	28
2.6.2 Arquitectura .....	29
2.6.3 Aplicaciones .....	29
2.7 Protocolos de comunicación serial.....	30
2.7.1 Puerto Serial Estándar.....	30
2.7.2 Puerto Interface Periférica Serial (SPI).....	30
2.7.3 Puerto Circuito Inter-Integrado (I2C).....	31
CAPÍTULO 3 .....	33
3 ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN .....	33
3.1 Descripción de la solución.....	33
3.2 Diagrama de Bloques.....	34
3.3 Arquitectura de la solución .....	36
3.3.1 Hardware .....	36
3.3.2 Software .....	36
3.4 Diagrama de Procesos.....	36



3.5	Diseño de la Red.....	39
3.6	Diseño de pruebas de la solución .....	40
CAPÍTULO 4 .....		43
4	IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE LA SOLUCIÓN.....	43
4.1	Implementación.....	43
4.1.1	Hardware .....	43
4.1.2	Software .....	43
4.2	Pruebas de funcionamiento de la solución.....	43
4.3	Pruebas de estrés de la solución .....	46
4.4	Resultados obtenidos.....	46
4.5	Análisis de resultados .....	56
CONCLUSIONES.....		63
RECOMENDACIONES .....		65
BIBLIOGRAFÍA .....		67
ANEXOS .....		69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Comparación de Tecnologías Inalámbricas .....	11
Figura 2.2: Estructura de Arquitectura Zigbee .....	12
Figura 2.3: Frecuencias de Operación y canales .....	13
Figura 2.4: Transferencia de datos en a) Red Beacon b) No Beacon .....	14
Figura 2.5: Ejemplo de DSSS sin modulación .....	15
Figura 2.6: Ejemplo de DSSS usando BPSK .....	15
Figura 2.7: Modulación O-QPSK .....	16
Figura 2.8: Topología de red .....	18
Figura 2.9: Modos de propagación de las ondas electromagnéticas .....	21
Figura 2.10: Zona de Fresnel .....	21
Figura 2.11: Gráfico de curvatura de la tierra.....	22
Figura 2.12: Esquema de Trabajo del protocolo SPI .....	31
Figura 2.13: Esquema de Trabajo del protocolo I2C .....	32
Figura 3.1: Diagrama de Bloques del sistema desarrollado .....	36
Figura 3.2: Diagrama de Flujo de la Red multimedia de Sensores inalámbricos .....	37
Figura 3.3: Diagrama de flujo del módulo de detección de espacios disponibles .....	38
Figura 3.4: Diagrama de flujo del módulo de aplicación móvil.....	39
Figura 3.5: Diseño de la red propuesta .....	40
Figura 4.1: Gráfica a diferentes Baud Rate y bytes transmitidos.....	44
Figura 4.2: Ubicación de Xbee a altura aproximada de 3 metros .....	45
Figura 4.3: Throughput a diferentes Bytes Transmitidos .....	47
Figura 4.4: Throughput a diferentes Bytes Transmitidos .....	48
Figura 4.5: Ubicaciones de prueba RSSI de Nodos Sensores y Nodo Coordinador en Campus ESPOL .....	50
Figura 4.6: Throughput con diferentes tiempo de espera del nodo sensor.....	51
Figura 4.7: Cálculo del Delay entre el Nodo Sensor y Nodo Coordinador .....	52
Figura 4.8: Cálculo del Jitter entre el Nodo Sensor y Nodo Coordinador.....	52
Figura 4.9: Delay utilizando 2 Hops Coordinador-Router-End Device .....	53
Figura 4.10: Ubicaciones de Nodos Sensores y Nodo Coordinador para pruebas de Delay y Jitter.....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla comparativa de la solución propuesta vs soluciones presentes en el mercado.....	3
Tabla 2: Asignación de Frecuencias de la Banda ISM en Diferentes países .....	10
Tabla 3: Frecuencias de Operación y Tasa de Transferencia IEEE 802.15.4 .....	16
Tabla 4: Calculo zona de Fresnel y compensación del radio de curvatura .....	22
Tabla 5: Pérdida es espacio libre a varias distancias .....	24
Tabla 6: Familia de Procesadores ATmega .....	29
Tabla 7: Comparación de Protocolo SPI con I2C .....	32
Tabla 8: Pruebas realizadas para probar solución planteada.....	42
Tabla 9: Medición RSSI en varias ubicaciones Parqueo FIEC .....	49
Tabla 10: Potencia de consumo Nodo Sensor .....	53
Tabla 11: Verificación de Imagen Recibida versus Imagen Transmitida .....	58
Tabla 12: Tiempos de Transmisión en diferentes formatos de compresión PNG .....	59
Tabla 13: Tiempos de transmisión en diferentes formatos de compresión JPG .....	61

# CAPÍTULO 1

## 1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

### 1.1 Descripción del Problema:

En la actualidad existe un gran número de zonas de parqueo tanto público como privado que no cuentan con un sistema que permita una gestión adecuada de los mismos, ya sea para la localización o conteo rápido de aparcamientos disponibles. La falta de implementación de este tipo de sistemas, genera un problema permanente a los conductores que desgastan tiempo en la búsqueda de un aparcamiento disponible y en muchos casos incide en el incremento del tráfico vehicular, principalmente en horas consideradas picos, donde hay muchos conductores en búsqueda de un parqueo para estacionar su vehículo.

Los sistemas actuales por lo general utilizan sensores electrónicos de proximidad o de campo magnético empotrados o montados sobre el asfalto, los cuales transmiten la información censada a un sistema central de procesamiento, el mismo que se encarga de mostrar mediante letreros electrónicos el número de aparcamientos disponibles y mediante lámparas LED los espacios que están disponibles. Estas soluciones presentan ciertas desventajas en zonas abiertas debido a que los sensores están expuestos a condiciones climáticas que pueden afectar el rendimiento de los mismos, además que el costo de implementación llega a ser elevado en la mayoría de los casos.

Finalmente dado que las redes inalámbricas bajo el estándar Zigbee son consideradas de baja tasa de transmisión de datos, limita el tipo de recurso que se desea transmitir a través de la red. Esto último representa una problemática a resolver cuando es de interés transmitir una imagen, que, para el caso de la localización del estado de aparcamientos, podría ser beneficioso debido a que una imagen puede almacenar una mayor cantidad de información.

### 1.2 Justificación

Teniendo en cuenta la problemática actual, vemos que es necesario gestionar de una manera más efectiva la localización y el estado de disponibilidad de los espacios de parqueo vehicular en zonas abiertas, con la finalidad de reducir el tiempo de búsqueda

de un aparcamiento disponible, así como también disminuir el congestionamiento vehicular que se genera.

La solución propuesta consiste en la implementación y análisis de desempeño de una Red Inalámbrica de Sensores bajo el estándar ZigBee.

Dado que el estándar de comunicaciones inalámbricas Zigbee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de Redes Inalámbricas de Área Personal (Wireless Personal Area Network, WPAN), las aplicaciones que hacen uso de la misma se ven beneficiadas por la maximización de la vida útil de sus baterías, pero limitadas por la baja tasa de transmisión de datos. Debido a esto último podemos mencionar que entre los principales desafíos a resolver está la transmisión de imágenes a través de la red con una baja tasa de transmisión, así como también procurar un uso adecuado del canal de transmisión debido a la cantidad de datos por enviar.

Con este proyecto se desea obtener una solución de bajo costo que pueda ser utilizada en zonas abiertas y que pueda brindar una mayor cantidad de ventajas frente a los sistemas actuales.

En la tabla 1 se puede observar el precio de cada una de las soluciones de las empresas y el prototipo de solución descrita en el proyecto. A cada empresa se le requirió una solución que se pueda emplear con un parqueadero de 10 estacionamientos ya que cada sensor se coloca en un estacionamiento. En el caso de nuestra solución, se cotizó también para 10 estacionamientos, pero usando una red de sensores inalámbricas, cada sensor se conecta con una cámara y puede detectar dependiendo de su ubicación de dos a cinco parqueos por lo cual se cotizaron 5 Arduino YUN con sus respectivas cámaras considerando la detección más baja.

La tabla 1 muestra los costos de la solución planteada para cubrir un espacio de parqueo de 10 vehículos versus otras soluciones del mercado.

Solución	Empresa	Precio
Smart Parking node x 10	Libelium	\$3197,07

Smart Parking USB Programmer	x 1		
Smart Parking Installation Key	x 1		
Magnet for contactless reset	x 1		
Smart Parking Configuration Service			
Technical consultancy 2 Horas			
Nodo Inalámbrico DX80N2X1W0P0ZTD	x 10	Inguibra cia. Ltda.	\$5.211,86
Gateway Inalámbrico DX80G2M2S-P	x 1		
Cable Adaptador x1			
Multi-sensor parking space detector	x 10	Tek Chile S.A.	\$8,240.00
Mounting adapter	x 10		
Base Station solar Powered			
Cloud Service (1 año)	x 12		
Sensores U-Spot	x 10	Urbiotica	\$2804,45
Gateway U-Box	x 1		
Repetidor U-Flag	x 1		
Soporte técnico			
Acceso a plataforma			
Arduino YUN	x 5	PROPUESTA	\$ 557
Raspberry pi 3	x 1		
Logitech HD Webcam C270	x 5		

**Tabla 1: Tabla comparativa de la solución propuesta vs soluciones presentes en el mercado.**

### 1.3 Objetivos:

#### 1.3.1 Objetivo General

Implementar y Analizar el desempeño de una Red Inalámbrica de Sensores para la gestión de aparcamientos en zonas abiertas.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar los requerimientos necesarios para la implementación de la solución.
2. Diseñar una Red Inalámbrica de Sensores ZigBee, en condiciones de la variación de temperatura natural que se presenta durante horas de la mañana, tarde y noche.
3. Desarrollar los diferentes componentes que conforman la solución propuesta.
4. Implementar la solución propuesta.
5. Realizar las respectivas pruebas de campo.
6. Analizar el desempeño de la red inalámbrica de sensores con variación

de distancia entre sensores, variación del tamaño de los paquetes transmitidos y la transmisión de imágenes de distintos formatos de compresión.

#### **1.4 Metodología:**

Para la implementación de la solución propuesta, se propone la siguiente metodología:

1. Analizar los requerimientos necesarios.
2. Investigar el estado del arte de las WMSN.
3. Investigar acerca del estándar ZigBee.
4. Seleccionar el hardware necesario para la implementación. El hardware mínimo requerido será de 3 nodos sensores y un nodo coordinador, y a partir de ese esquema se determinará la cantidad apropiada de nodos por cada coordinador para un funcionamiento adecuado de la red de sensores, usando una topología estrella y el método Round Robin.
5. Desarrollar los distintos componentes que conforman la solución propuesta.
6. Implementar la solución propuesta.
7. Realizar las respectivas pruebas de campo.
8. Analizar el desempeño de la red inalámbrica de sensores.

#### **1.5 Limitaciones**

Durante el desarrollo del proyecto nuestra principal limitación fue encontrar un lugar apropiado para realizar las pruebas de campo, se lo intenta realizar en los parqueos exteriores de los centros comerciales, pero fuimos impedidos de hacerlo porque el personal de seguridad de dichos lugares requería que tengamos un permiso especial del administrador del centro comercial, el cual fue difícil de conseguir. Los mismos inconvenientes se presentaron en campus educativos y por esa razón la mayoría de las pruebas se las realizó dentro del campus de la ESPOL, principalmente en el parqueo de la FIEC y en otras facultades del campus.

A pesar que las pruebas se hicieron en un campus educativo, el sistema puede ser puesto en operación en otros lugares como parqueos de los centros comerciales, parqueos en vías públicas, etc.

## CAPÍTULO 2

### 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hace una revisión de varios conceptos relacionados principalmente con el protocolo de comunicación inalámbrico utilizado para formar la red de sensores y de los principales componentes de hardware que conforman los nodos.

#### 2.1 Red Inalámbrica de Sensores (WSN).

En esta sección revisaremos el estado del arte de las redes inalámbricas de sensores (WSN), sus características, usos, ventajas y desventajas frente a las redes alámbricas.

##### 2.1.1 Características.

Las redes de sensores están conformadas de acuerdo a su aplicación por unos pocos o miles de nodos, ubicados de manera estratégica para detectar y reaccionar ante eventos y fenómenos de nuestro interés [1].

Los dispositivos utilizados por las redes de sensores son pequeños y de baja potencia, son conocidos como nodos sensores y son capaces de detectar el ambiente físico, para recolectar y procesar los datos detectados y comunicarse entre sí para cumplir con una tarea específica [2].

Una red de sensores está conformada por 4 componentes básicos: (1) Los sensores localizados; (2) La red de Interconexión normalmente inalámbrica; (3) El punto central de recolección de la información y (4) Los recursos informáticos en el punto central para manejar los datos, estados, eventos. Los nodos de computación y de detección son considerados como parte de la red de sensores y de hecho el procesamiento también se puede realizar sobre cada uno de los nodos de la red [3].

Las WSN son desplegadas sobre la tierra, subterránea y submarinas y enfrentan diferentes desafíos y limitaciones en el entorno donde operan. Existe 5 tipos de WSN: WSN Terrestre, WSN Subterránea, WSN Submarina, WSN Multimedia y WSN móvil [4].

- **WSN Terrestre:** La redes de sensores terrestres están conformadas



por cientos a miles de nodos de sensores inalámbricos en un área predeterminada y pueden estar ubicados de manera ad hoc o en base a una planificación previa [4].

En una WSN no estructurada (ad hoc) es muy difícil la administración, mantenimiento y detección de fallas debido a la cantidad de sensores existentes, mientras que una WSN estructurada se la puede implementar con un menor costo de administración y mantenimiento [1].

- **WSN Subterránea:** Es un tipo especial de WSN donde la mayoría de los nodos sensores se despliegan bajo el suelo. Existen dos tipos de tecnología propuestas para la comunicación en entornos subterráneos: la radiación electromagnética de ondas de radio y la inducción magnética. De acuerdo al tipo de aplicación de la Wireless Sensor Underground Network (WSUN), se puede aprovechar alguna de las dos tecnologías de comunicación, pero a futuro se prevé que existirá una integración estratégica de ambas tecnologías [2].
- **WSN Submarina:** Este tipo de redes consiste de una serie de nodos sensores y vehículos desplegados bajo el agua. A diferencia de las WSN terrestres, hay menos sensores submarinos desarrollados y por esa razón son mucho más caros. La comunicación bajo el agua se suele hacer a través de la transmisión de ondas acústicas. El mayor desafío en la comunicación acústica bajo el agua es superar el limitado ancho de banda, los grandes retardos de propagación y el desvanecimiento de la señal [4].

Los canales acústicos submarinos presentan un gran retardo de propagación, un bajo ancho de banda disponible y una alta probabilidad de error. Además los sensores submarinos generalmente son alimentados por baterías las cuales son difíciles de reemplazar o recargar debajo del agua y por esa razón la eficiencia energética debe ser una consideración de diseño muy importante [5].

- **WSN Multimedia:** Las WSN multimedia tienen una gran utilidad para el monitoreo y seguimiento de eventos multimedia como video, audio

e imágenes [6].

Las WSN multimedia (WMSN) consisten de nodos sensores de bajo costo equipados con micrófonos y cámaras, interconectados entre sí a través de una red inalámbrica para obtención de los datos, procesamiento, correlación y compresión. Deben ser instalados de manera planificada para que puedan tener cobertura. Los desafíos que enfrentan las WSN multimedia son: Alta demanda de ancho de banda, Alto consumo de energía, provisión de calidad de servicio, técnicas de procesamiento y compresión de datos, diseño multicapas [1].

- **WSN Móvil:** Este tipo de redes está conformada por nodos sensores que pueden moverse por sí mismos e interactuar con el entorno físico [7].

Las WSN móviles se pueden utilizar para monitorear el medio ambiente, rastreo de objetivos, búsqueda y rescate, monitoreo en tiempo real de material peligroso, monitoreo de área de desastres. Los nodos de sensores móviles después de haber sido desplegados, se pueden mover a áreas donde existe algún evento para tener la cobertura requerida. Los nodos de sensores móviles pueden alcanzar un mayor grado de cobertura y conectividad que los nodos de sensores estáticos [4].

### 2.1.2 Aplicaciones.

Los grandes avances en el diseño de sensores han permitido que estos sean cada vez más pequeños, de bajo costo y con una mayor precisión de medición. La tecnología para detectar, medir y controlar tiene avances significativos no solo en la ciencia e ingeniería, sino también en una amplia gama de aplicaciones [3].

A continuación, se ilustra algunas de las aplicaciones de las WSN:

- **Seguridad y Vigilancia:** Se pueden utilizar redes de sensores para vigilar y monitorear edificios, aeropuertos, metros y otras infraestructuras críticas como las redes eléctricas, redes de telecomunicaciones, plantas de energía [8].

- **Control de Casa:** Este tipo de redes de sensores brindan control, seguridad, comodidad y conservación. Se puede gestionar desde cualquier lugar la calefacción, las luces, el sistema de enfriamiento del hogar. Podemos automatizar el control de múltiples sistemas domésticos y tener sensores inalámbricos para monitorear una variedad de condiciones [3].
- **Automatización Industrial:** Estas redes de sensores utilizados en la automatización industrial nos permiten control, conservación, eficiencia y seguridad. Ayuda a que los sistemas de manufactura y control sean más confiables y mejoran la administración de los activos a través del monitoreo continuo de los equipos críticos. Reducen los costos de energía a través de un proceso de fabricación optimizado [3].
- **Cuidado de la Salud:** Los dispositivos médicos, la tecnología de la información y las comunicaciones están convergiendo, lo que permitirá mejorar radicalmente la asistencia de salud en el hogar. Los avances tecnológicos permitirán que los pacientes tengan un rol preponderante en el monitoreo y cuidado de su propia salud [9].
- **Agricultura y Ganadería:** La industria de la agricultura puede obtener grandes beneficios a través del uso de WSN. Para que los cultivos tengan un máximo rendimiento, los agricultores debería monitorear las grandes extensiones de tierra donde existe numerosas características que pueden ser monitoreadas por medio de sensores como son los nutrientes, luz solar, niveles de temperatura, niveles de humedad, etc [10].
- **Militares:** Las características de las redes de sensores inalámbricas que permiten su aplicación en varios campos, nos permite también usarla en el campo militar. La información que recopile la red de sensores (NS) le puede permitir a las máximas autoridades militares tomar decisiones para mantener seguros a los soldados. Las WSN se pueden utilizar también para tareas como la administración de suministros, la administración del equipamiento y para hacer un inventario de daños. Una de las principales cualidades que tienen este tipo de redes y que permite una aplicación militar es que se pueden conformar fácilmente y están desarrolladas para ser tolerantes a fallos

[10].

### 2.1.3 Ventajas y Desventajas de las WSN

Las principales ventajas de una WSN son las siguientes [11]:

- Las configuraciones de la red se pueden realizar sin una infraestructura fija.
- Es muy adecuado para lugares inaccesibles tales como, el mar, bosques profundos, montañas o áreas rurales.
- Es flexible si se desea incorporar nuevas estaciones de trabajo
- El precio de implementación es bajo
- Evita mucho cableado
- Se puede incorporar nuevos dispositivos en cualquier momento
- Se puede acceder a la red de manera centralizada

Las principales desventajas de una WSN inalámbrica son las siguientes[11].

- Es menos segura porque los hackers podrían acceder a un punto y obtener toda la información.
- La velocidad es menor en comparación a redes cableadas.
- Mayor complejidad de configuración.
- Pueden ser afectadas por el entorno (paredes, microondas, atenuación por distancia, etc)
- No es posible controlar la propagación de las ondas

## 2.2 Estándar Zigbee

La tecnología estándar Zigbee permite implementar redes inalámbricas de bajo costo y de corto alcance que puede ser útil para comunicar los nodos que capturan las imágenes de los vehículos con el equipo receptor. Los dispositivos Xbee que utilizan el protocolo Zigbee normalmente pueden alcanzar distancias de 120 metros en exteriores, pero existen otros modelos de dispositivos Xbee que operan a la misma frecuencia de 2.4 GHz y que tienen una mayor potencia de salida con la que se puede alcanzar hasta 3 Kilómetros de distancia.

### 2.2.1 Características

En la actualidad contamos con varios estándares inalámbricos como son: WiFi, Bluetooth, tecnología celular, RFID, Wibree, Wimax, Wireless USB. Sin embargo el estándar Zigbee nace como una necesidad para atender una

parte del mercado que no la cubren otras tecnologías. Otras tecnologías buscan dar una conexión de última milla al Internet a velocidades medias o altas, en cambio Zigbee dado que su velocidad es baja y su alcance es corto, es utilizado normalmente para atender el mercado de conexión y control de sensores inalámbricos [12].

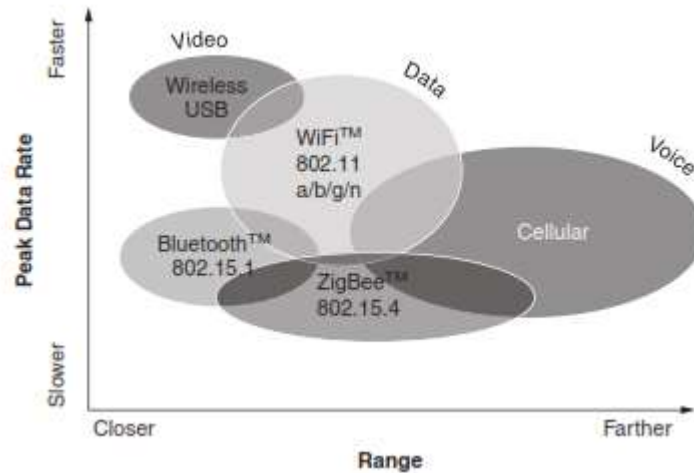
Los dispositivos inalámbricos basados en Zigbee operan en las bandas de frecuencia de los 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz a una velocidad máxima de datos de 250 Kbps, Zigbee está orientado a la atención de aplicaciones de baja velocidad, bajo costo y larga duración de la batería. Zigbee puede operar en un modo dormido, de tal forma que su batería puede durar muchos años antes que deba ser reemplazada [13].

En la Tabla 2 se muestra las frecuencias asignadas a la banda ISM y su uso alrededor del mundo.

	BANDA	APLICABILIDAD	ANCHO DE BANDA	CANALES
2.4 GHz	ISM	Mundial	250 kbps	16
915 MHz	ISM	U.S.A	40 kbps	10
868 MHz		Europa	20 kbps	1

**Tabla 2: Asignación de Frecuencias de la Banda ISM en Diferentes países [14]**

En la figura 2.1 se muestra la comparación de diferentes tecnologías inalámbricas considerando el rango de distancia versus la velocidad de datos, en la misma se puede evidenciar que los dispositivos Xbee que usan el protocolo Zigbee son de alcance medio y de bajo Throughput.



**Figura 2.1: Comparación de Tecnologías Inalámbricas [12].**

El estándar IEEE.802.15.4 es una red de área personal inalámbrica de baja velocidad (LR-WPAN) diseñada para dispositivos de baja potencia y tienen las siguientes características [14]:

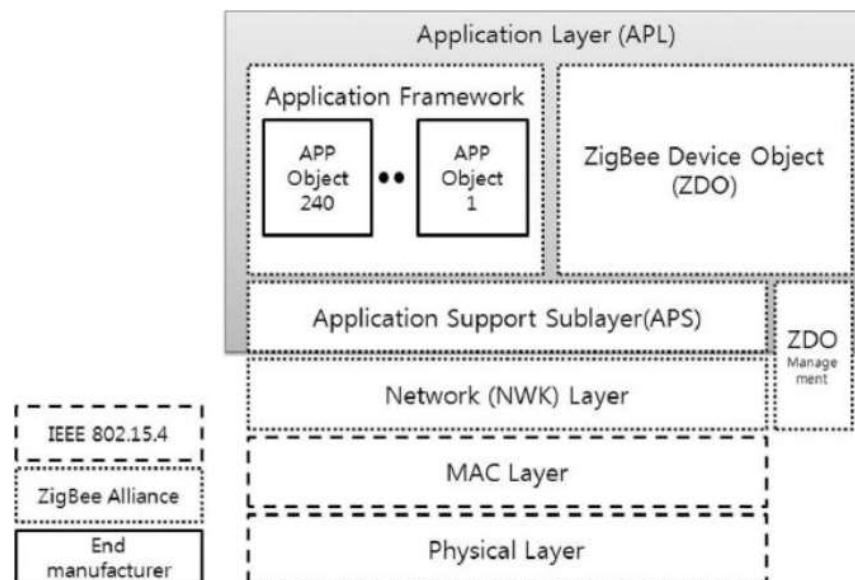
- Tasas de datos de 20 a 250 Kbps
- Diferentes topologías de operación como estrella y malla
- Direccionamiento basado en direcciones cortas de 16 bits o MAC normales de 64 bits
- Soporte de confirmación de los datos transferidos
- Detección de energía (ED)
- Indicador de calidad del enlace (LQI)
- Seguridad multinivel

Zigbee usa el concepto de IEEE 802.15.4 de FFD y RFD y crea tres tipos de dispositivos Zigbee. El Zigbee Coordinador (ZC) es un FFD único en la red Zigbee y es el que establece la red Zigbee a la cual se pueden unir otros dispositivos, el coordinador se encarga de enrutar los mensajes entre los RFD. El dispositivo final Zigbee (End Device), se conecta a un sensor o ejecuta funciones de control y puede ser del tipo FFD o RFD de acuerdo a la aplicación que este ejecutando en la red. El dispositivo Zigbee Enrutador (ZR) es un FFD que permite extender el rango físico de una red Zigbee para que tenga una mayor área de cobertura, aparte de la opción de enrutamiento se lo puede usar también como un dispositivo final para cumplir funciones de monitoreo y control de la red de sensores [15].

### 2.2.2 Arquitectura

La pila de arquitectura Zigbee está conformada por capas e implementa algunas de las capas descritas por el modelo OSI. Zigbee implementa la capa física (PHY) y la capa de enlace (MAC) tal como las establece el estándar 802.15.4, implementa la capa de red (NWK) descrita por la alianza Zigbee y las capas 4 a la 7 que corresponden a las capas de Transporte, Sesión, Presentación y Aplicación del modelo OSI son implementadas por la subcapa de soporte de aplicaciones (APS) y por la capa objeto de dispositivo Zigbee (ZDO) descrita por la alianza Zigbee [12].

La figura 2.2 nos muestra la pila de protocolos del estándar Zigbee.

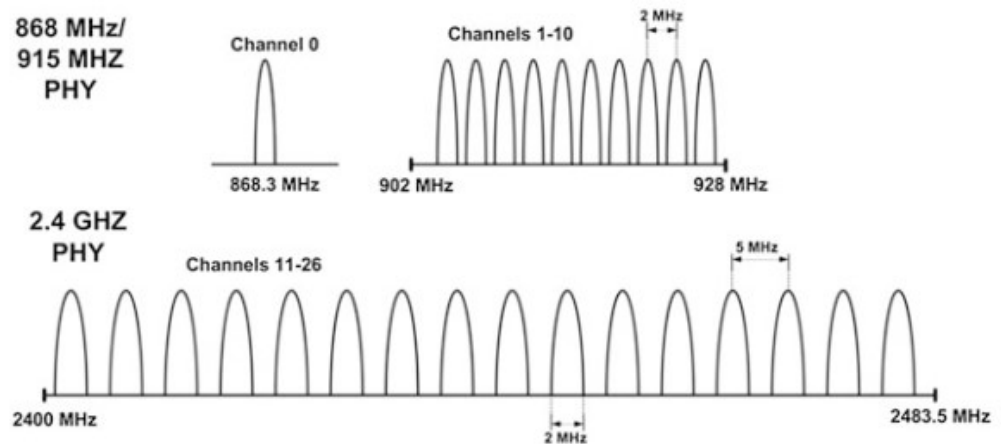


**Figura 2.2: Estructura de Arquitectura Zigbee [16].**

La especificación IEEE 802.15.4 a nivel de capa física utiliza las frecuencias 868/915 MHz y 2,4 GHz de la banda de frecuencia Industrial, Científica y Médica (ISM). La banda de frecuencia de 868 MHz es utilizada en Europa y soporta un canal con una máxima velocidad de datos de 20 Kbit/s. La banda de frecuencia de 915 MHz se utiliza en Estados Unidos y Australia, soporta 10 canales y una máxima velocidad de datos de 40 Kbit/s. La banda de 2,4 GHz es utilizada a nivel mundial, soporta 16 canales y una velocidad de datos máxima de 250 Kbit/s. La codificación del canal se hace a través del

espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) y la modulación utilizada en las frecuencias de 868/915 MHz es la modulación por desplazamiento de fase binario (BPSK) y para la frecuencia de 2,4 GHz se utiliza la modulación ortogonal por desplazamiento en cuadratura (O-QPSK) [17].

En la figura 2.3 se indican las frecuencias de operación de la banda ISM y los canales que implementan cada una de ellas.



**Figura 2.3: Frecuencias de Operación y canales [18].**

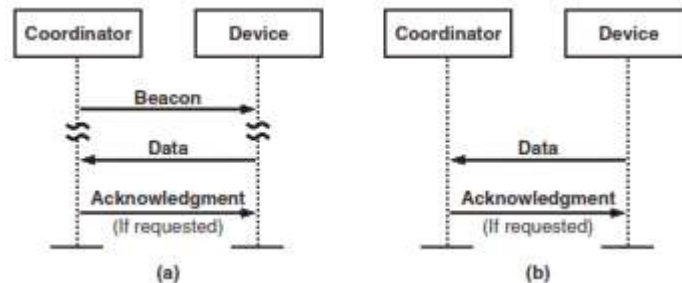
**Acceso al Medio:** IEEE 802.15.4 utiliza una forma sencilla para que varios dispositivos usen el mismo canal de frecuencia para acceso al medio. El mecanismo de acceso al canal utilizado es acceso múltiple con detección de portadora con prevención de colisiones (CSMA-CA). Cuando un dispositivo desea transmitir, primero realiza una verificación de canal libre (CCA) para asegurarse que el canal no lo esté usando otro dispositivo. Posteriormente el dispositivo comienza transmitiendo su propia señal. La decisión para declarar un canal libre o disponible se puede determinar en base a medir la energía espectral del canal de frecuencia de nuestro interés o detectar el tipo de la señal de ocupación [13].

**Métodos de acceso al medio:** Existe dos métodos de acceso al canal, con contención o sin contención. En el método de acceso al canal basado en contención, todos los dispositivos que quieran transmitir usando el mismo canal de frecuencia, usan el mecanismo de CSMA-CA y el primero que encuentra el canal libre transmite. En el método sin contención el dispositivo



coordinador de la red de área personal (PAN), dedica un espacio de tiempo (time slot) a cada dispositivo particular, esto se conoce como espacio de tiempo garantizado (GTS), lo que implica que un dispositivo con un GTS asignado puede transmitir durante ese tiempo sin necesidad de usar el mecanismo CSMA-CA [13].

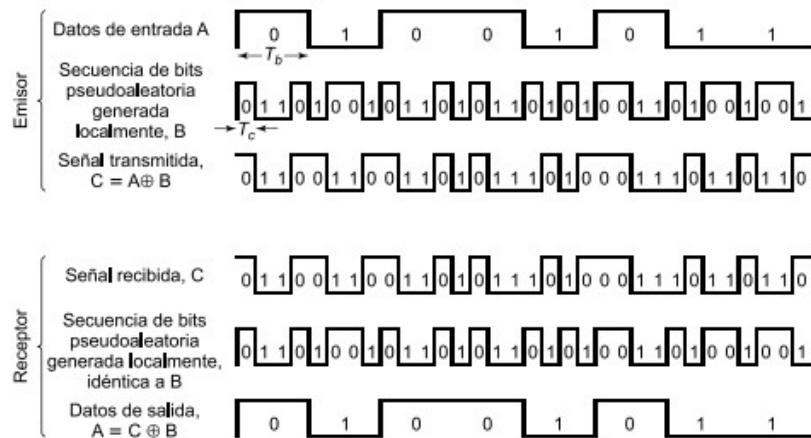
En la figura 2.4 se muestran dos redes, la que implementa algún tipo de sincronismo (a) y la que se implementa por contención (b).



**Figura 2.4: Transferencia de datos en a) Red Beacon b) No Beacon[13]**

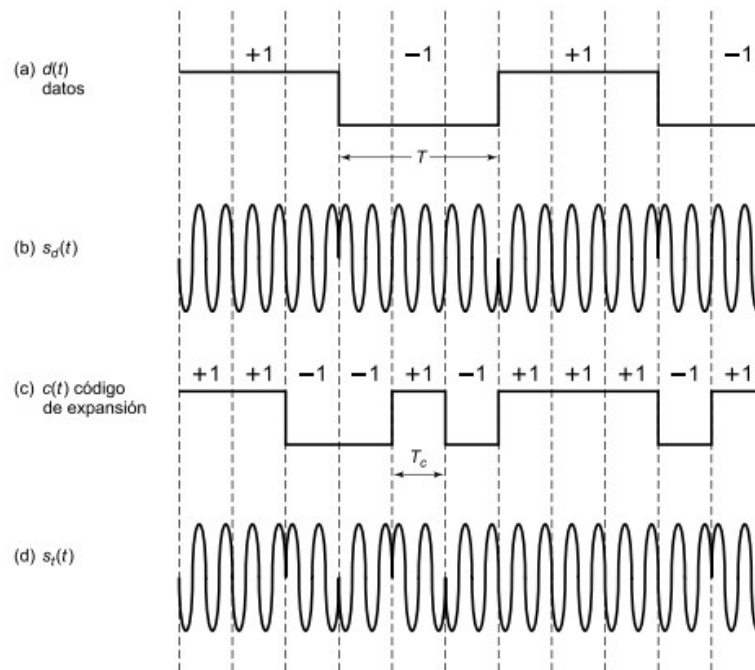
**Codificación del Canal:** Para la codificación del canal existen dos técnicas de ensanchado del espectro, espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) y espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS). Zigbee utiliza DSSS y consiste en tomar la secuencia de bits que representan a los datos y multiplicarlos por un código pseudoaleatorio con una velocidad de bit o chip mayor que la velocidad de los datos. De esta manera el producto tiene una mayor velocidad de símbolos que los datos originales provocando el ensanchamiento del espectro. En el receptor, la señal original puede ser recuperada a partir de multiplicar la señal recibida por el mismo código pseudoaleatorio, los receptores que no tengan el mismo código verán a la señal como ruido de banda ancha [19].

En la figura 2.5 se muestra la técnica DSSS sin incluir algún tipo de modulación



**Figura 2.5: Ejemplo de DSSS sin modulación [20].**

En la figura 2.6 se muestra la técnica de espectro ensanchado por secuencia directa, implementando modulación BPSK.



**Figura 2.6: Ejemplo de DSSS usando BPSK [20]**

En FHSS el transmisor cambia la frecuencia de la portadora, mediante un patrón conocido por el receptor, para un receptor que no conozca el patrón la señal recibida será como un ruido de corta duración [19].

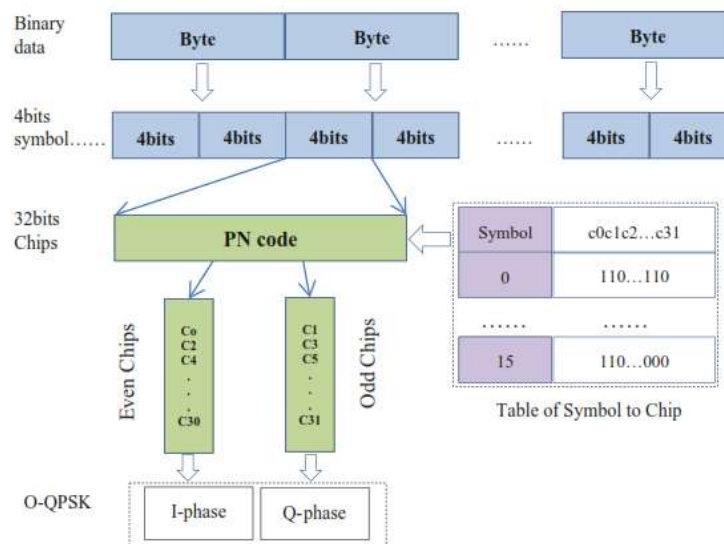
La tabla 3 muestra las velocidades de bit, chip y símbolo, con diferentes métodos de ensanchado de la señal y modulaciones.

Frecuencia (MHz)	Número de Canales	Modulación	Velocidad de Chip (Kchip/s)	Velocidad de bit (Kb/s)	Velocidad de Símbolo (Ksymbol/s)	Método de Ensanchado
868-868.6	1	BPSK	300	20	20	Binario-DSSS
902-928	10	BPSK	600	40	40	Binario-DSSS
868-868.6	1	ASK	400	250	12,5	20-bits PSSS
902-928	10	ASK	1600	250	50	5-bits PSSS
868-868.6	1	O-QPSK	400	100	25	16-Array Ortogonal
902-928	10	O-QPSK	1000	250	62,5	16-Array Ortogonal
2400-2483.5	16	O-QPSK	2000	250	62,5	16-Array Ortogonal

**Tabla 3: Frecuencias de Operación y Tasa de Transferencia IEEE 802.15.4 [14].**

**Modulación de la señal:** A la frecuencia de 2.4 GHz, Zigbee utiliza la modulación O-QPSK. En BPSK y O-QPSK los datos se encuentran en la fase de la señal, mientras que en ASK los datos se encuentran en la amplitud de la señal [14].

En la figura 2.7 se muestra el proceso de modulación O-QPSK.



**Figura 2.7: Modulación O-QPSK [21].**

En O-QPSK cada byte se divide en dos símbolos de 4 bits, a cada símbolo de 4 bits se le aplica el código pseudoaleatorio de 32 bits de longitud, el radio

codifica la secuencia de chips usando O-QPSK que funciona igual que QPSK, pero Q se desplaza en la mitad de un chip que causa un cambio de fase continuo y una envolvente constante [21].

### 2.2.3 Aplicaciones

El protocolo Zigbee se utiliza normalmente en aplicaciones integradas, que sean de bajo consumo de energía y de baja velocidad. Entre las principales aplicaciones donde se utiliza dispositivos Zigbee tenemos [17]:

- Control y entretenimiento en el Hogar
- Redes de Sensores inalámbricas
- Control Industrial
- Detección Integrada
- Recolección de datos médicos
- Detectores de humo e intrusos
- Automatización de edificios

### 2.2.4 Topologías

Las redes Zigbee se pueden conectar de diferentes maneras para dar forma a la estructura de la red. Esta forma de conexión lógica representa la topología que es independiente de la ubicación física de las radios [22].

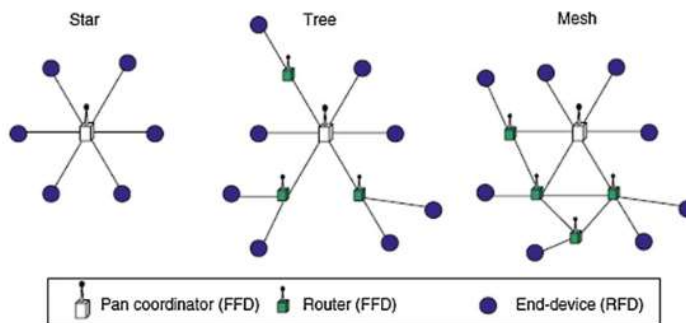
Las redes Zigbee pueden conformar las siguientes topologías [22]:

- **Punto a Punto:** Este tipo de topología es la más sencilla, se forma a partir de dos radios o nodos. Uno de los nodos debe ser el coordinador para que se pueda formar la red y el otro puede ser enrutador o dispositivo final.
- **Estrella:** La formación de esta red requiere de un dispositivo coordinador ubicado en el centro de la topología estrella y se conecta a todos los dispositivos que lo rodean. El coordinador es el responsable de enrutar los mensajes entre los dispositivos, los dispositivos finales no se pueden comunicar de manera directa.
- **Malla:** Este tipo de topología utiliza dispositivos enrutadores adicionalmente al dispositivo coordinador. Los dispositivos enrutadores pueden pasar mensajes a otros dispositivos enrutadores y a los dispositivos finales según se requiera. El coordinador es una especie de enrutador especial que además es el que administra la red. Los dispositivos finales se pueden conectar a los enrutadores o

al coordinador.

- **Árbol:** Este tipo de topología consta de enrutadores que forman una especie de columna vertebral con los dispositivos finales, que se agrupan en cada enrutador.

La figura 2.8 muestra las diferentes topologías de red que se pueden implementar con los dispositivos Xbee.



**Figura 2.8: Topología de red [21]**

### 2.2.5 Modos de Trabajo

Los dispositivos Zigbee tienen básicamente 3 modos de trabajo o de operación que son el Coordinador, Enrutador y Dispositivo Final. Para que se forme la red siempre tiene que existir al menos dos dispositivos, uno de ellos tiene que ser un coordinador y el otro dispositivo puede ser un enrutador o Dispositivo Final [22].

- **Coordinador (ZC):** Es el dispositivo más poderoso y existe solo uno sobre la red. Es el dispositivo que forma la red y el resto de dispositivos que quieren formar parte de la red se tienen que unir al coordinador [21].
- **Enrutador (ZR):** Los enrutadores son dispositivos intermedios que pueden retransmitir paquetes dirigidos para otros nodos. Ellos se pueden unir a una red ya creada y pueden tener nodos secundarios que se unen a la red a través de una comunicación con el enrutador [21].
- **Dispositivo Final (ZED):** Hay circunstancias en las que no se requiere tener un dispositivo que este todo el tiempo activo consumiendo energía. Para estos casos se pueden usar End Devices que son dispositivos con funciones reducidas de un router, se pueden unir a una red para enviar y recibir información, pero no puede enrutar

información, puede permanecer en un estado dormido para ahorrar energía [22].

### 2.2.6 Tipos de Dispositivos

En la actualidad existen muchos dispositivos que trabajan con el estándar Zigbee que han sido desarrollados para diferentes aplicaciones entre los que tenemos los siguientes [23]:

- Sensores de temperatura
- Sensores de movimiento
- Sensores para ventanas y puertas
- Control de luz inteligente
- Sensores multipropósito
- Teclado
- Medidores de consumo de gas y electricidad
- Sensores de fuga de agua
- Dispositivo Xbee

**Dispositivo Xbee:** El dispositivo inalámbrico Xbee es el que se utiliza para enviar información de los nodos sensores al equipo coordinador para el posterior procesamiento de la señal.

Uno de los estándares comúnmente utilizado en las redes de sensores es el IEEE 802.15.4, ya que este protocolo se enfoca en comunicaciones entre dispositivos de bajo costo, baja velocidad y una baja potencia de consumo. Existen muchas marcas de hardware en el mercado que utilizan el estándar 802.15.4, pero los dispositivos más utilizados por principiantes y expertos son los Xbee, fabricados por Digi International por su facilidad de uso [24].

Los módulos Xbee utilizan un protocolo de comunicación serial para conectarse a dispositivos externos, como una computadora o un microcontrolador por medio de un transmisor receptor universal asíncrono (UART) [25].

Existen 2 tipos de radios Xbee, los Xbee serie 1 se utilizan para enlaces punto a punto y los Xbee serie 2 que me permiten establecer redes punto a punto, multipunto y mallas. Las series 1 y 2 de los Xbee vienen con 2

diferentes potencia de transmisión, regular y PRO, los Xbee PRO tienen una mayor potencia de transmisión y además son de mayor tamaño [22].

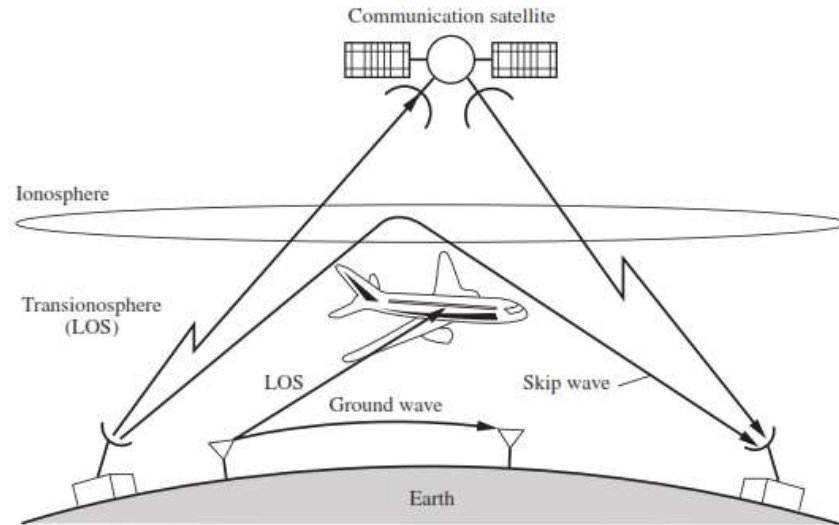
Los dispositivos Xbee son manufacturados con diferentes tipos de antenas para la transmisión y recepción de señales y su alcance depende del tipo de antena utilizado y la potencia de emisión de la señal transmitida. Las antenas disponibles en los dispositivos Xbee son las siguientes [22]:

- Antena de alambre:
- Antena Chip:
- Antena PCB:
- Conector U. FL:
- Conector RPSMA:

Para que los dispositivos inalámbricos Xbee operen de manera adecuada, deben de estar ubicados de tal forma que exista línea de vista (LOS) entre el transmisor y el receptor, además se debe determinar la altura adecuada de operación tomando en consideración la zona de Fresnel para garantizar menos pérdida de potencia de la señal transmitida hasta llegar al receptor y que este reconozca la señal. Debido a que la distancia de operación de los Xbee utilizados en la aplicación de parqueos es menor a 300 metros no se está considerando la curvatura de la tierra.

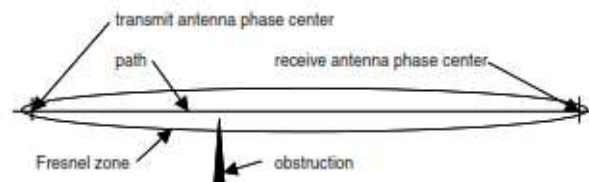
Existen tres tipos de canales de transmisión que son: Canal de propagación de onda electromagnética no guiada, canal de onda electromagnética guiada y canal óptico. Salvo el caso que se esté transmitiendo una señal entre naves espaciales en el espacio ultraterrestre, el medio de transmisión entre el transmisor y receptor no se aproxima al espacio libre. Dependiendo de la distancia involucrada y la frecuencia de la onda radiada la propagación de la señal puede ser por línea de vista, onda superficial u onda ionosférica. A frecuencias superiores a los 300 MHz la propagación de las ondas de radio es por línea de vista (LOS) [26].

En la figura 2.9 se muestra varios modos de propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio libre.



**Figura 2.9: Modos de propagación de las ondas electromagnéticas [26]**

**Línea de Vista (LOS) y Zona de Fresnel:** La línea de vista entre una antena de transmisión y una antena de recepción es un camino o ruta limpio y sin obstrucciones, que además debe de considerar que no haya obstrucciones en la primera zona de Fresnel para que exista una óptima comunicación. La zona de Fresnel se asemeja a un elipsoide tal como se muestra en la figura 2.10 [27].



**Figura 2.10: Zona de Fresnel [27].**

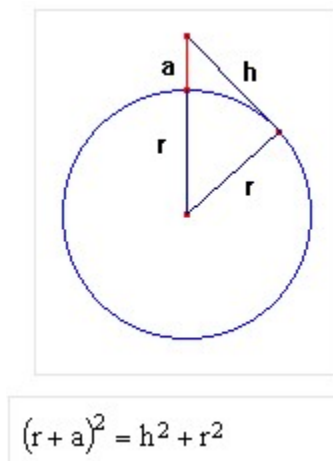
Para el cálculo del radio de la primera zona de Fresnel se utilizó la siguiente ecuación 2.1 y se consideró que dicha zona este el 70% despejada,  $d$  es la distancia entre el transmisor y receptor y se expresa en kilómetros,  $f$  es la frecuencia expresada en Gigahercio y el resultado  $r$  es en metros.

$$r = 17,31 \sqrt{\frac{d}{4f}} \quad (2.1)$$

Para el cálculo de la altura ( $a$ ) para compensar el radio de curvatura de la tierra, se utilizó una formula aproximada considerando la figura 2.11 con un



radio de la tierra de 6.378 Km y h como la distancia entre el transmisor y el receptor, el resultado es muy similar a los valores obtenidos con una fórmula trigonométrica



**Figura 2.11: Gráfico de curvatura de la tierra**

De la figura 2.11 se obtiene la fórmula 2.2 para calcular la altura a en kilómetros de compensación.

$$a = \sqrt{r^2 + h^2} - r \quad (2.2)$$

Utilizando las fórmulas indicadas obtenemos la siguiente Tabla 4, donde está el valor de altura mínima a la que tienen que estar instalados los dispositivos Xbee.

Longitud 1ra Zona Fresnel (m)	Distancia (Km)	Frec. (GHz)	70% Libre 1era Zona	Curvatura de la Tierra (m)
1,77	0,1	2,4	1,24	0,00
2,50	0,2	2,4	1,75	0,00
3,06	0,3	2,4	2,14	0,01
3,53	0,4	2,4	2,47	0,01
5,59	1	2,4	3,91	0,08
12,49	5	2,4	8,74	1,96
17,67	10	2,4	12,37	7,84

**Tabla 4: Calculo zona de Fresnel y compensación del radio de curvatura**

Tomando en consideración una distancia máxima de 400 metros entre cualquier transmisor y el receptor en la zona de parqueo, la altura a la que deben de estar ubicados los dispositivos Xbee es a 2,47 metros y no se verán

afectados por el radio de curvatura de la tierra ya que a esa distancia es insignificante su efecto.

Las transmisiones en el espacio libre, ocasionan la pérdida de la señal a medida que la señal se aleja de su origen debido a la dispersión geométrica de la señal, lo que causa que la señal llegue solo a cierta distancia en condiciones de ser captada y procesada por el receptor.

La fórmula para el cálculo de la pérdida en el espacio libre (FSL) a cualquier frecuencia viene dado por la ecuación 2.3, con la frecuencia  $f$  expresada en MHz y la distancia  $d$  en kilómetros.

$$L_{FSL} = 32,45 + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (2.3)$$

Los dispositivos Xbee utilizados operan a una frecuencia de 2,4 GHz, por esa razón podemos simplificar la formula anterior a la siguiente ecuación 2.4 con la distancia  $d$  expresada en kilómetros.

$$L_{FSL} = 100 + 20 \log(d) \quad (2.4)$$

A partir de la ecuación simplificada para el cálculo de las perdidas en el espacio libre para la frecuencia de 2.4 GHz, obtenemos la tabla #, en la cual se muestra la pérdida en decibelios a varias distancias.

Los dispositivos Xbee utilizados (Xbee ZB), tienen una potencia de transmisión de 3 dBm y una sensibilidad de -96 dBm y su funcionamiento fue probado en el parqueadero de la ESPOL hasta una distancia de 200 metros para obtener el margen recomendado de aproximadamente 10 dB.

La tabla 5 nos enseña la pérdida en el espacio libre, utilizando la frecuencia de operación de los Xbee desde 0,1 hasta los 10 kilómetros.

Pérdida es Espacio Libre (dB)	Distancia (Km)	Frec. (GHz)
80,00	0,1	2,4
86,02	0,2	2,4
89,54	0,3	2,4
92,04	0,4	2,4
100,00	1	2,4
113,98	5	2,4
120,00	10	2,4

**Tabla 5: Pérdida es espacio libre a varias distancias**

El cálculo del Throughput nos da una idea clara de la velocidad a la cual se puede transmitir una imagen desde el nodo sensor al nodo coordinador y está definido por el tamaño de la imagen en bits dividido para el tiempo de transmisión, tal como se indica en la ecuación 2.5.

$$\textit{Throughput} = 8 * \frac{(\textit{Tamaño de la Imagen en Bytes})}{\textit{Tiempo de Tx de la Imagen}} \quad (2.5)$$

Con el fin de evaluar la precisión del sistema que hará el reconocimiento de los vehículos sobre las imágenes capturadas por el nodo sensor y transmitidas al nodo coordinador, se puede construir una matriz de confusión, conformada por los siguientes elementos:[28]

- **Verdadero Positivo (VP):** Eventos que sucedieron y que el sistema los detecto correctamente.
- **Falso Positivo (FP):** Eventos que no ocurrieron y que el sistema los detecta como si hubieran ocurrido.
- **Falso Negativo (FN):** Son aquellos eventos que ocurrieron y el sistema no los detecto.
- **Verdadero Negativo (VN):** Eventos que no ocurrieron y el sistema lo estableció correctamente.

A partir de los elementos descritos, la precisión del sistema utilizado se la puede determinar con la siguiente formula 2.6 que se indica a continuación:

$$\textit{Precisi3n del Sistema} = \frac{VP+VN}{VP+FP+VN+FN} \quad (2.6)$$

### 2.3 XCTU

El XCTU es un software multiplataforma gratuito, desarrollado por DIGI que sirve para realizar la configuraci3n y pruebas de dispositivos Xbee, los mismos que se pueden conectar a la computadora a trav3s del puerto USB.

### 2.4 Sensores CMOS

Actualmente es muy com3n encontrar sensores en computadoras, veh3culos, barcos, aviones, tel3fonos, etc., y tienen la capacidad de monitorear los fen3menos f3sicos.

#### 2.4.1 Caracter3sticas

Los sensores son dispositivos que se caracterizan por responder a un est3mulo f3sico como luz, calor, sonido, magnetismo, etc., y transforman ese est3mulo en una se1al mec3nica o el3ctrica, que se puede digitalizar para determinar la magnitud del dato medido [29].

Los sensores tienen diferentes caracter3sticas, entre las que se destacan las siguientes [29]:

- **Funci3n de Transferencia:** es la relaci3n entre el est3mulo de entrada y la se1al saliente.
- **Sensibilidad:** es la respuesta de cambio de la se1al de salida, en relaci3n al cambio de est3mulo de entrada.
- **Precisi3n:** es el m3ximo error esperado entre la se1al de salida real y la ideal.
- **Resoluci3n:** es el cambio de se1al m3nimo detectable
- **Rango din3mico:** es el rango m3ximo de est3mulos f3sicos que se pueden aplicar en la se1al de entrada, para convertirse en una se1al el3ctrica.
- **Ruido:** es la se1al adicional que se genera junto con la se1al producida por el est3mulo f3sico.

#### 2.4.2 Tipos

Los sensores tienen varios tipos de utilidad y son capaces de medir la mayor3a de est3mulos f3sicos. Una forma de clasificarlos es de acuerdo a la

cantidad medida [29].

- **Cantidades Mecánicas:** velocidad, desplazamiento, vibración, fuerza, presión, etc.
- **Cantidades de Fluido:** densidad, viscosidad, etc.
- **Cantidades eléctricas:** voltaje, corriente, resistencia, impedancia, campo magnético, etc.
- **Cantidades térmicas:** temperatura, imagen infrarroja, etc.
- **Cantidades químicas:** valores de PH, enzimas, iones, etc.
- **Cantidades biológicas:** anticuerpos, concentración de sustratos de enzimas, etc.

## 2.5 Minicomputadora Raspberry Pi

En esta sección se revisará las especificaciones de las mini computadoras Raspberry.

### 2.5.1 Características

La Raspberry Pi es una computadora de pequeño tamaño en la cual se pueden ejecutar funcionalidades multimedia o aplicaciones, fue desarrollada por la fundación Raspberry Pi ubicada en el Reino Unido. Existen dos modelos de Raspberry A y B, normalmente el modelo A viene con la mitad de memoria del modelo B y no viene con puerto de red Ethernet [30].

El equipo de la fundación Raspberry Pi trabajo por seis años en la creación de un dispositivo accesible y barato que enseñe a los estudiantes los conceptos de programación y como trabajan las computadoras, finalmente el Raspberry Pi fue liberado el año 2012 [31].

El Raspberry Pi ha ido logrando la meta de la fundación, de contribuir en el mejoramiento de la formación en informática de los estudiantes y actualmente es utilizado por personas jóvenes y adultas, principiantes y experimentadas que han impulsado la venta en millones de unidades y Raspberry Pi también ha hecho que el aprendizaje del sistema operativo Linux sea más fácil [32].

Las principales ventajas de los Raspberry Pi sobre los computadores actuales son [32]:

- El Raspberry Pi es muy barato.

- Es muy pequeño, comparable a una tarjeta de crédito.
- Se puede reemplazar el sistema operativo fácilmente en segundos, reemplazando la SD o micro SD.
- El SoC hace que el Raspberry Pi tenga más interfaces, protocolos de comunicación y otras características que los computadores convencionales.
- Los pines GPIO permiten al Raspberry Pi controlar dispositivos del mundo real.

### 2.5.2 Arquitectura

El Raspberry Pi implementa la arquitectura SoC e integra en el mismo circuito integrado, CPU, GPU, SDRAM, Puertos USB, de acuerdo al modelo viene con diferentes especificaciones de memoria, velocidad de procesador, puertos USB, HDMI, GPIO y Ethernet, etc. [31].

- **CPU:** Es el elemento principal del Raspberry Pi y es responsable de procesar las instrucciones generadas por los programas compilados, el circuito es manufacturado por la corporación Broadcom con tecnología RISC (Reduced Instruction Set Computer) y su velocidad de acuerdo al modelo va de 700 MHz a 1.4 GHz y de 1 a 4 núcleos.
- **GPU:** la unidad de procesamiento gráfico, es responsable por todo el procesamiento matemático requerido para la presentación de los gráficos, es manufacturado por la corporación Broadcom, soporta varios formatos de video libres o con licencia.
- SDRAM:
- Puertos USB:
- GPIO:

### 2.5.3 Aplicaciones

El Raspberry Pi sobresale entre otros equipos como el cerebro para elaborar todo tipo de proyecto. Existen miles de proyectos documentados sobre el internet, entre las principales aplicaciones donde podemos utilizar un Raspberry Pi tenemos los siguientes [32]:

- Automatización del Hogar
- Seguridad del Hogar
- Estación Meteorológica
- Computador portátil

- Controlador de robot
- Controlador de drones
- Servidor web
- Servidor de Correos
- Rastreador de GPS
- Controlador de cámara Web
- Cafetera
- Controlador de motor eléctrico
- Administrador de fotografías con lapso de tiempo
- Controlador de juegos
- Computadora a bordo de automóviles
- Centro de entretenimiento

## 2.6 Placa Arduino

En esta parte se revisará las principales funcionalidades de los equipos micro controladores Arduino.

### 2.6.1 Características

Arduino es una plataforma que nos permite crear prototipos electrónicos de código abierto y se basa en Hardware y Software flexible y fácil de usar. Estos equipos usan la serie de microprocesadores Atmel y en el mercado existen muchos modelos de equipos Arduino disponibles con diferentes características de Hardware [33].

Los procesadores utilizados en los equipos domésticos, difieren mucho de los procesadores utilizados en las computadoras de trabajo, ya que el equipo doméstico no requiere gran poder de procesamiento. Los equipos domésticos necesitan monitorear condiciones analógicas o digitales como el tiempo y la temperatura y controlar algunos dispositivos como el elemento de calentamiento en las tostadoras, por esa razón los procesadores utilizados en estos equipos son más baratos y tienen menos poder de procesamiento [34].

Las principales ventajas de los equipos microcontroladores Arduino son [35]:

- **Bajo costo:** Las tarjetas Arduino son de muy bajo costo en comparación a otras plataformas de microcontroladores.

- **Multiplataforma:** El software Arduino (IDE) es compatible con los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux.
- **Fácil de Usar:** El software Arduino (IDE) es muy amigable y fácil de usar por programadores principiantes y muy expertos.
- **Código Abierto:** El Arduino es un software de código abierto y puede ser programado con los lenguajes C, C++ o AVR-C. Los usuarios pueden crear también una variedad de módulos.

### 2.6.2 Arquitectura

En el mercado existe una variedad de placas Arduino, las cuales tienen diferentes características de procesador, memoria flash, EEPROM, SRAM e interfaces analógicas y digitales.

- **Procesador:** es el elemento principal del microcontrolador, y es responsable de ejecutar todas las decisiones y tareas de cálculo del sistema [36].
- **Memoria:** Se utiliza para almacenar el sistema operativo, datos o programas [34].
  - o **Memoria Flash:** Se usa para almacenar el programa del usuario
  - o **Memoria SRAM:** Almacena los datos del programa
  - o **Memoria EEPROM:** Almacena datos a largo plazo

La tabla 6 nos indica las diferentes capacidades de memoria de los Arduino YUN, de acuerdo al tipo de procesador utilizado.

Procesador	Flash	SRAM	EEPROM
Atmega48	4KB	512B	256B
ATmega88	8KB	1KB	512B
ATmega168	16KB	1KB	512B
ATmega328	32KB	2KB	1KB
ATmega32u4	32KB	2.5KB	1KB

**Tabla 6: Familia de Procesadores ATmega [34]**

- **Interfaces Analógicas y Digitales:** es útil para conectar la placa con el mundo exterior.

### 2.6.3 Aplicaciones

La placa Arduino puede ser utilizada en diferentes tipos de proyectos y



aplicaciones como:

- Automatización del Hogar
- Seguridad del Hogar
- Control de Sensores
- Rastreador GPS
- Control de motores eléctricos
- Control de Robots
- Alarma
- Control de Vehículos
- Control de Luz con sensor de sonido
- Sistema de monitoreo de plantas

## **2.7 Protocolos de comunicación serial**

En esta parte se indicará los tres principales métodos de comunicación serial que se utiliza en los equipos Arduino.

### **2.7.1 Puerto Serial Estándar**

La interface serial sobre los equipos Arduino usa dos pines de interface digital para la comunicación serial con dispositivos externos. Todos los dispositivos Arduino usan por defecto los pines 0 y 1 para la interface serial primaria, el pin 0 es el puerto de recepción (RX) y el pin 1 es el puerto de transmisión (TX). La interface serial se usa para transferir los códigos desarrollados al equipo Arduino. Los desarrolladores del equipo Arduino conectaron la interface serial con el puerto USB para que sea fácil la conexión del equipo Arduino a la computadora a través de un cable USB y por esa causa no se deben utilizar esos pines como entradas o salidas digitales [34].

### **2.7.2 Puerto Interface Periférica Serial (SPI)**

El protocolo utilizado por la interface Periférica Serial, usa una conexión serial sincrónico para comunicarse con uno o más dispositivos periféricos a corta distancia. Una conexión serial sincrónica requiere una señal de reloj independiente para sincronizar la transferencia de datos entre dispositivos. Muchos sensores usan el protocolo SPI para comunicarse con un sistema central o Host [34].

El protocolo SPI usa tres señales que conecta a todos los dispositivos en el

bus SPI [34]:

- **MISO:** Línea para que el dispositivo esclavo envíe datos al dispositivo maestro.
- **MOSI:** Línea para que el dispositivo maestro envíe datos al dispositivo esclavo.
- **SCK:** una señal de reloj serial para sincronizar la transferencia de datos

La figura 2.12 nos indica las señales utilizadas por el protocolo SPI en el rol de Master y esclavo.

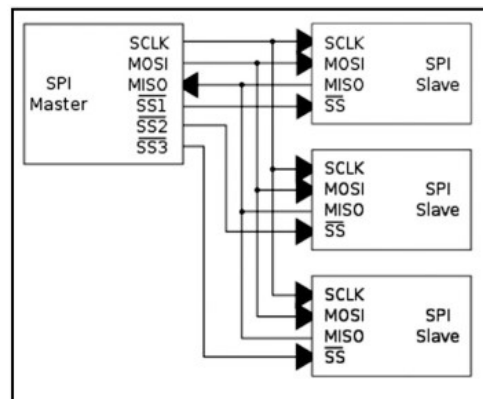
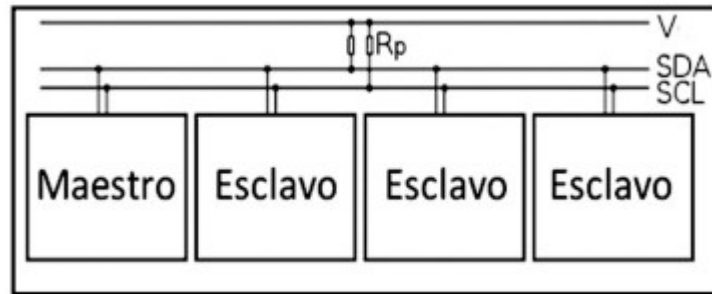


Figura 2.12: Esquema de Trabajo del protocolo SPI [37].

### 2.7.3 Puerto Circuito Inter-Integrado (I2C)

El protocolo I2C fue desarrollado por la corporación Phillips Semiconductor, para que varios dispositivos electrónicos integrados se puedan comunicar a través de un sistema que utiliza un bus de 2 hilos. El I2C fue diseñado para comunicar dispositivos a muy corta distancia, y es utilizado muy comúnmente para comunicar dispositivos que se encuentran en la misma placa, pero también se lo utiliza para comunicar dispositivos externos a corta distancia utilizando las señales Línea de Datos Serial (SDA) y Reloj Serial (SCL) [34].

La figura 2.13 nos enseña una gráfica con el modo de operación y conexión de los dispositivos utilizados en el protocolo I2C.



**Figura 2.13: Esquema de Trabajo del protocolo I2C [37].**

Muchos dispositivos como los acelerómetros, potenciómetros digitales y displays, pueden operar haciendo uso de los protocolos SPI o I2C [38].

La tabla 7 contiene las ventajas más destacadas de los protocolos SPI y I2C.

SPI ADVANTAGES	I2C ADVANTAGES
Can operate at higher speeds	Requires only two communication lines
Generally easier to work with	
No pull-up resistors needed	Built-in-Arduino hardware support
Built-in-Arduino hardware support	

**Tabla 7: Comparación de Protocolo SPI con I2C [38].**

## CAPÍTULO 3

### 3 ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

#### 3.1 Descripción de la solución

La solución propuesta consiste en la elaboración de un prototipo, que se constituya en una alternativa al problema planteado de ubicar de manera efectiva parqueos disponibles en espacios abiertos. El prototipo debe ser capaz de captar y procesar imágenes y enviar la información de esa imagen procesada a una base de datos, para que a través de un aplicativo que el conductor previamente ha descargado y que se conecta con la base de datos, reciba la información sobre la disponibilidad de un espacio de parqueo. De esta manera, se busca reducir el volumen de tráfico provocado por los conductores mientras conducen sus vehículos en busca de un parqueo disponible y minimizar ese tiempo de búsqueda que se convierte en crítico en las horas pico.

Esto se logra usando una red de sensores inalámbricos, cuyo diseño tiene la capacidad de detectar la presencia de vehículos en cierta área de estacionamiento, por medio de una imagen capturada. La imagen es procesada a través de una Cloud API y la aplicación determina los espacios que se encuentran disponibles y le informa al conductor a través de un aplicativo Android, la disponibilidad de un espacio de parqueo.

La solución es útil para ciudades o zonas que tienen alta densidad de vehículos y donde se requiere optimizar el uso de los espacios de parqueo, y una red de sensores puede contribuir en la disminución de la congestión vehicular y eso conlleva a que se reduzca lógicamente el consumo de combustible de los vehículos, porque ahora los conductores tienen que recorrer menos tiempo para ubicar un parqueo disponible donde estacionar su vehículo.

La solución o prototipo propuesto, está conformado por dispositivos microcontroladores, cámaras y dispositivos de transmisión inalámbrica de bajo costo, así como también se utiliza software libre para construir la aplicación.

La idea de utilizar los dispositivos de hardware y software descritos, es que el desarrollo de este prototipo además de cumplir con su misión principal de detectar y determinar espacios de parqueos disponibles en espacios abiertos, se convierta en una solución de bajo costo, que puede ser utilizada, adaptada y mejorada con otros componentes de hardware de bajo costo existentes en el mercado.

### 3.2 Diagrama de Bloques

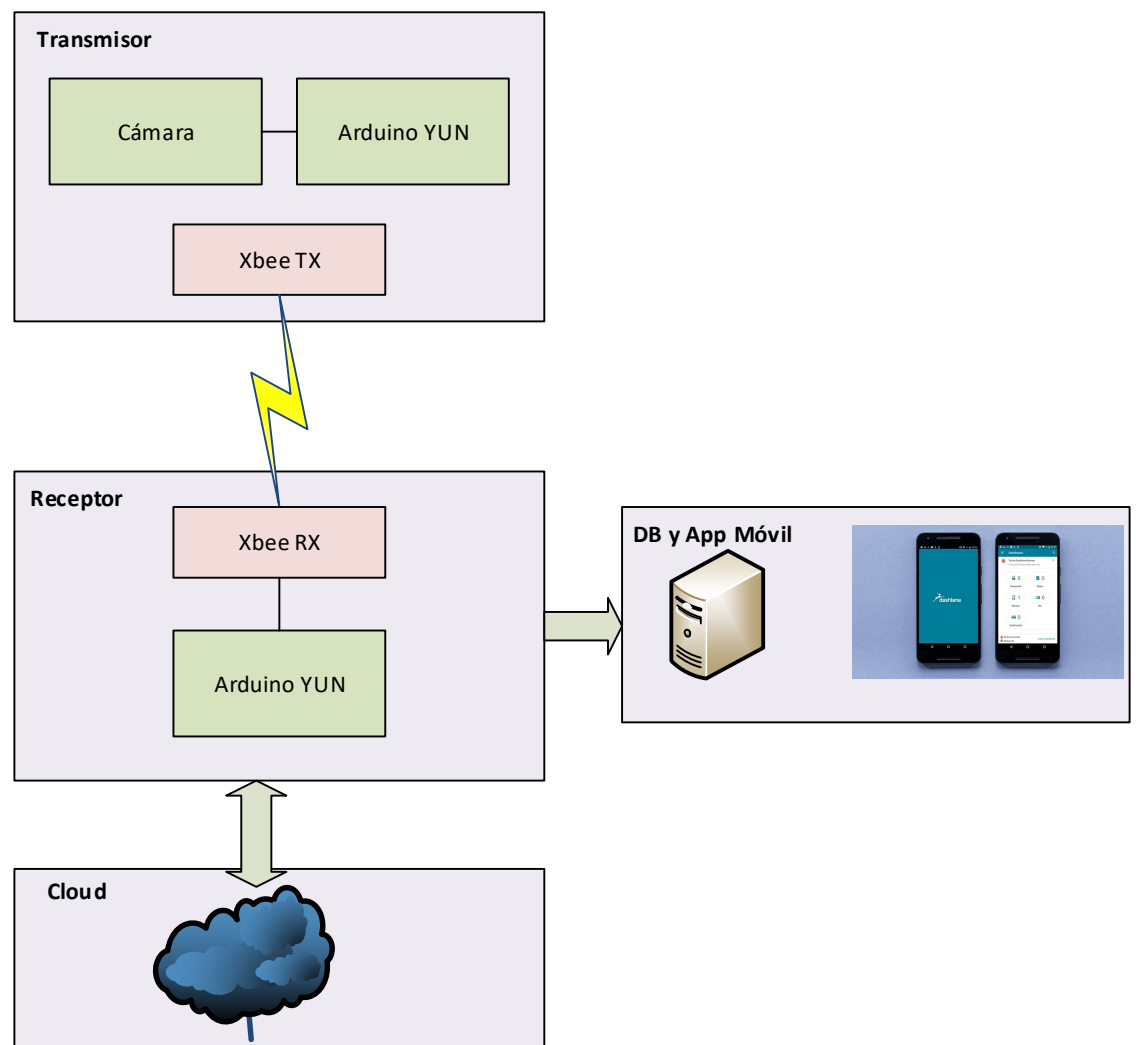
En la figura 3.1, se puede observar el diagrama de bloques del sistema desarrollado. El sistema consiste básicamente de cuatro bloques que son:

- **Bloque de Transmisión:** Consiste en una cámara y un dispositivo Xbee conectados a un Arduino YUN. Este bloque se encuentra establecido en el nodo sensor y se encarga de capturar la imagen de los vehículos estacionados en el área de parqueo, hacer un pre-procesamiento de la misma y posteriormente transmitirla al nodo coordinador.
- **Bloque de Recepción:** Está conformado por un dispositivo Xbee conectado a un Arduino YUN. Este bloque es responsable de recibir la imagen capturada por el nodo sensor y enviarla a un equipo Raspberry PI, que será el encargado de enviar la imagen capturada a la nube y posteriormente recibir el resultado de la imagen procesada para enviar esa información a la base de datos.
- **Bloque Cloud:** Este bloque es un Servicio Web de terceros, que se encarga de procesar la imagen que recibe y determinar que objetos de esa imagen son considerados vehículos, y devuelve en coordenadas cartesianas los cuatro puntos que encierran cada uno de los vehículos detectados.
- **DB y App Móvil:** El equipo Raspberry PI en el bloque Cloud envía la información de los espacios disponibles a una base de datos que es de terceros y esta base de datos se encarga de la administración y respaldo de la información recibida. La aplicación móvil se conecta con la base de datos indicada y recibe la información de los espacios de parqueo disponibles, para que el conductor se dirija al espacio disponible más cercano a él.

Este prototipo tiene un punto crítico que se encuentra en el Bloque de Transmisión, y que es la etapa de la captura de las imágenes de los vehículos estacionados en la zona de parqueo, ya que todo el diseño y desarrollo del mismo se basa en la imagen capturada, por eso es necesario previo a su implementación buscar un lugar adecuado dentro de la zona de parqueo, para

hacer el montaje de las cámaras y hacer la calibración inicial de las mismas, para que el programa conozca previamente los espacios de parqueo disponibles en cada imagen, para que posteriormente cuando la imagen sea procesada por la Cloud API, pueda determinar de manera correcta que espacios dentro de esa imagen están libres u ocupados. Las pruebas realizadas se hicieron durante el día y en la noche, y a pesar que la Cloud API hace un buen reconocimiento de los vehículos durante la noche, es necesario tener una iluminación adecuada, para que en la imagen captada el reconocimiento de los vehículos sea satisfactorio.

La figura 3.1 nos presenta el diagrama de bloques de la red de sensores propuesta.



**Figura 3.1: Diagrama de Bloques del sistema desarrollado**

### **3.3 Arquitectura de la solución**

#### **3.3.1 Hardware**

A continuación se detallan los elementos de Hardware utilizados en la implementación de la propuesta planteada:

- Cuatro Arduino YUN (3 Nodos Sensores y 1 Nodo Coordinador).
- Cuatro dispositivos Xbee.
- Cuatro Cables USB para alimentar a los Arduino.
- 1 SD Card instalada en cada microcontrolador.
- Cuatro dispositivos reguladores de 5v a 3.3v para alimentar a los dispositivos Xbee.
- 1 Raspberry Pi

#### **3.3.2 Software**

El Software utilizado es el siguiente:

- Arduino IDE
- Raspbian
- Python
- Android Studio
- PHP

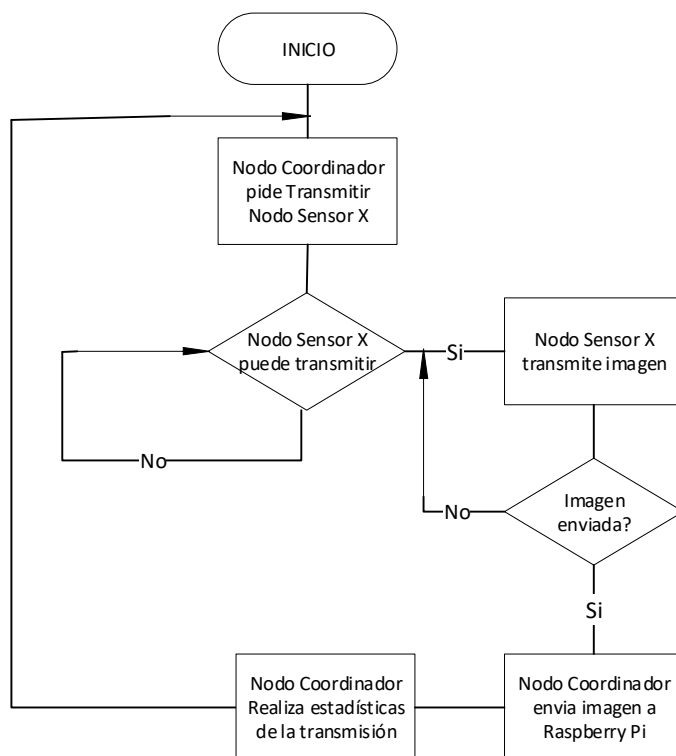
### **3.4 Diagrama de Procesos**

En la figura 3.2, se puede observar el diagrama de funcionamiento del nodo coordinador.

El nodo coordinador a través del algoritmo Round Robin implementado, solicita el envío de la imagen a uno de los nodos sensores que conforman la red inalámbrica de sensores. El microcontrolador del nodo sensor le envía el comando a la cámara para que capture la imagen del área de parqueo y le hace un procesamiento inicial previo a ser transmitida. La imagen capturada es enviada al nodo coordinador, que recibe la imagen y la envía a un ordenador Raspberry Pi que almacena las imágenes de los nodos sensores y a través de un proceso envía las imágenes almacenadas a la Cloud API para que sea procesada y se determine los espacios de parqueo disponibles.

El Raspberry Pi tiene una mayor capacidad de procesamiento en comparación al Arduino YUN, por esa razón la funcionalidad de enviar la imagen recibida por el nodo sensor a la Cloud API, es entregada al Raspberry Pi, para que el Arduino YUN que conforma el nodo coordinador se libere de esa función y se dedique solamente a obtener las imágenes de los nodos sensores, lo que hace mucho más eficiente el sistema desarrollado.

La figura 3.2 nos explica el modo de operación del nodo coordinador al solicitar y recibir la imagen.



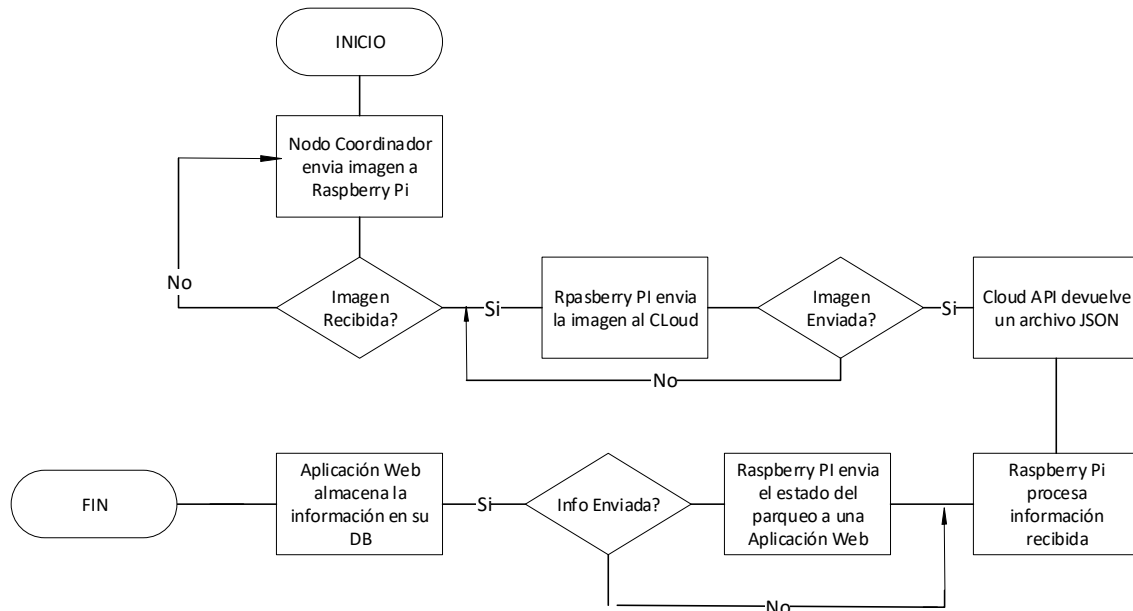
**Figura 3.2: Diagrama de Flujo de la Red multimedia de Sensores inalámbricos**

En la figura 3.3, se puede visualizar el funcionamiento del ordenador Raspberry Pi en la red planteada. El Raspberry pi, recibe la imagen de uno de los nodos coordinadores de la red inalámbrica y la almacena, para posteriormente enviar la imagen al Cloud API que se encarga de determinar si existen vehículos o no en la imagen. EL Cloud API devuelve al Raspberry Pi un archivo Json con las coordenadas de los vértices donde se detectó que existen vehículos en caso de que se hayan encontrado uno o más. Un aplicativo instalado en el Raspberry Pi realiza un cálculo matemático en base a las coordenadas recibidas por la Cloud API y las coordenadas iniciales obtenidas durante la calibración de la cámara y determina que parqueos están libres u



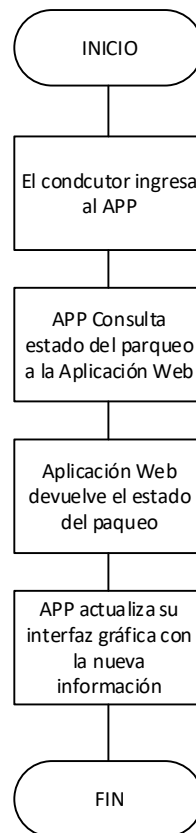
ocupados. La información del estado de los espacios de parqueo obtenido, se sube a una base de datos en la nube para su posterior uso.

La figura 3.3 nos enseña el diagrama de operación del ordenador Raspberry Pi, una vez que recibe la imagen del nodo coordinador.



**Figura 3.3: Diagrama de flujo del módulo de detección de espacios disponibles**

En la figura 3.4 se puede observar el diagrama de flujo de la aplicación móvil. Cuando el conductor ingresa en la aplicación, esta se conectará a una base de datos en la nube para extraer información sobre el estado del parqueo. Esta información es devuelta a la aplicación móvil, que actualizará su interfaz gráfica mostrando el estado actual de los espacios de parqueo.



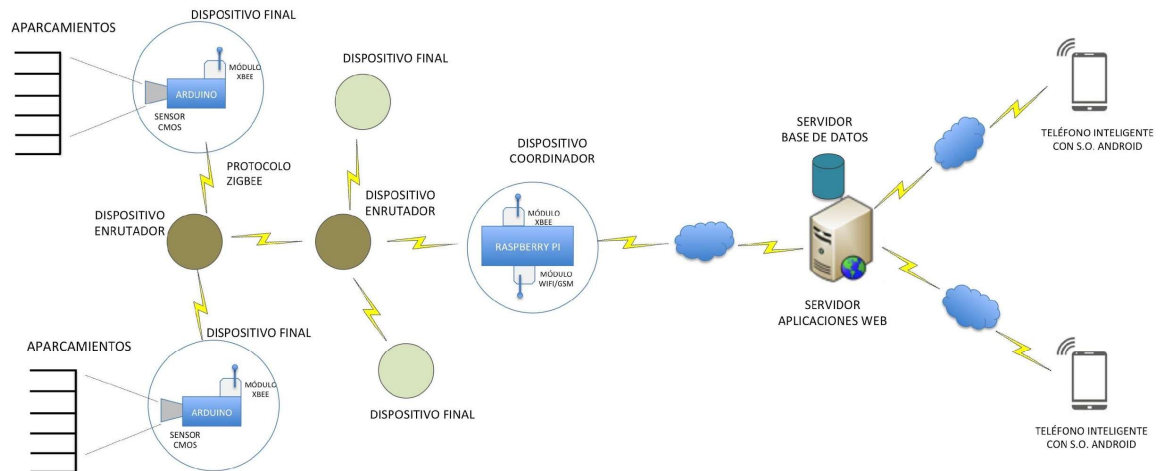
**Figura 3.4: Diagrama de flujo del módulo de aplicación móvil**

### 3.5 Diseño de la Red

La red propuesta es una red de topología estrella, que se comporta en la práctica como una red punto a punto, debido a la implementación del algoritmo Round Robin en el nodo coordinador, lo que evita que se sature el medio o canal de transmisión, porque solo un dispositivo puede transmitir al mismo tiempo y mientras está transmitiendo los otros nodos sensores están esperando ser consultados para poder transmitir.

El nodo coordinador puede ser ubicado en el centro de la red y los nodos sensores se pueden ubicar alrededor de él, para que la distancia entre el nodo coordinador y nodo sensor sea máximo de 120 metros que es la distancia a la que operan normalmente los dispositivos Xbee con los que se desarrolló las pruebas y se puede obtener un área de cobertura de 240 metros y en caso que se quiera abarcar una mayor distancia, se pueden usar otros dispositivos Xbee cuya cobertura llega a los 3 Km.

La figura 3.5 muestra el esquema de la red propuesta, con cada uno de los componentes requeridos para implementar la red propuesta.



**Figura 3.5: Diseño de la red propuesta**

### 3.6 Diseño de pruebas de la solución

Se detallan a continuación las pruebas que se realizarán para evaluar la red multimedia de sensores inalámbricos planteada.

- **Pruebas de Selección de Formato de Imagen:** En esta prueba se realiza la transmisión de la imagen del nodo sensor al nodo coordinador en varios formatos, para determinar el tiempo de transmisión de la misma y para verificar si la aplicación Cloud API reconoce los vehículos en la imagen en el formato seleccionado.
- **Pruebas de delay:** Consiste en el cálculo del tiempo promedio de arribo de una trama enviada desde el nodo sensor al nodo coordinador. Para este cálculo el nodo sensor captura una imagen, la transmite y se determina el promedio de tiempo de demora de todas las tramas en llegar al nodo coordinador desde el nodo sensor, tomando en cuenta el tiempo desde que se forma la trama en el nodo sensor. En esta prueba se ubica el nodo coordinador en una posición fija y se va variando la distancia del nodo sensor con respecto al nodo coordinador hasta 150 metros con un intervalo de 30 metros.
- **Prueba jitter:** Consiste en el cálculo del tiempo promedio de arribo de una

trama, respecto a la siguiente trama que llega al coordinador. Para este caso también el nodo sensor captura una imagen, la transmite y se determina el tiempo promedio de arribo de tramas respecto a la trama recibida previamente. No se toma en consideración el tiempo de espera para el envío de la siguiente trama implementando en el nodo sensor. En esta prueba se tiene el nodo coordinador en una posición fija y se varía la distancia del nodo sensor con respecto al nodo coordinador hasta 150 metros con un intervalo de 30 metros.

- **Pruebas de estrés:** Consiste en variar el tamaño del frame de 10 a 80 bytes considerando que el máximo tamaño del frame incluido la carga útil (Payload) soportado por los dispositivos Xbee ZB es de 84 bytes. Además, se considera variar el retardo entre frame que es el tiempo de espera para enviar el siguiente frame una vez enviado el frame anterior. Estas pruebas se las realiza a una distancia entre el nodo sensor y el nodo coordinador de 120 metros.
- **Pruebas de potencia RSSI:** Consiste en obtener la potencia recibida en dBm al transmitir una imagen del nodo sensor hacia el nodo coordinador. Para realizar esta prueba, se tiene al nodo coordinador en una posición fija y se va variando la distancia del nodo sensor desde 20 metros hasta 120 metros con un intervalo de 30 metros.
- **Pruebas del Throughput:** Consiste en obtener la velocidad expresada en bit/segundos al transmitir una imagen del nodo sensor hacia el nodo coordinador. Para realizar esta prueba, se tiene al nodo coordinador en una posición fija e ir variando la distancia del nodo sensor desde 20 metros hasta 120 metros con un intervalo de 30 metros.
- **Prueba de precisión del sistema de detección de vehículos en imágenes:** Esta matriz se la construye para conocer el porcentaje de precisión del sistema utilizado para la detección de vehículos en las imágenes.
- **Prueba de consumo energético:** Esta prueba sirve para determinar el consumo promedio de los equipos microcontroladores propuestos como solución para la implementación de la detección de vehículos en espacios abiertos.
- **Prueba de calidad de imagen:** Se envía varias imágenes desde el nodo sensor al nodo coordinador, y se compara las imágenes a través de Octave.

La tabla 8 nos muestra la compilación de todas las pruebas realizadas para verificar la correcta operación de la red de sensores diseñada.

Prueba	Descripción
Pruebas de Selección del formato de la Imagen	Permite seleccionar el formato adecuado con el que el nodo sensor captura la imagen, considerando el tiempo y la precisión del reconocimiento de los vehículos en la imagen
Delay	Nodo coordinador fijo y variación de la distancia del nodo sensor con respecto al nodo coordinador hasta 240 metros con un intervalo de 30 metros: $Delay = (T\_Ack - T\_Inicial) / 2$ . $T\_Ack$ = tiempo del mensaje de confirmación.
Jitter	Nodo coordinador fijo y variación de la distancia del nodo sensor con respecto al nodo coordinador hasta 240 metros con un intervalo de 30 metros ( $Jitter = Tiempo\ Trama(n+1) - Tiempo\ Trama(n)$ )
Estrés	Variación del tamaño de la trama de 10 a 80 bytes. Variación del delay entre tramas
RSSI	Nodo coordinador fijo y variación de la distancia del nodo sensor desde 20 metros hasta 120 metros con un intervalo de 30 metros (Generado por XCTU)
Throughput	Nodo coordinador fijo y variación de la distancia del nodo sensor desde 20 metros hasta 120 metros con un intervalo de 30 metros (Ecuación 2.5)
Prueba de Precisión del sistema de detección de Vehículos en imágenes	Validar la precisión del sistema (Ecuación 2.6)
Consumo energético	Calcular la potencia de operación del nodo sensor y nodo coordinador (Uso de Multímetro)
Calidad de imagen	Comparar la imagen transmitida con la imagen recibida (Octave: Corr2 e immse)

**Tabla 8: Pruebas realizadas para probar solución planteada**

## CAPÍTULO 4

### 4 IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE LA SOLUCIÓN

#### 4.1 Implementación

La implementación de la solución propuesta a la problemática planteada, se realizó con dispositivos de bajo costo, a nivel de cámaras, microcontroladores y dispositivos de comunicación inalámbricos.

##### 4.1.1 Hardware

El hardware del nodo sensor está conformado por los siguientes elementos:

- Arduino YUN: Contiene el programa para la toma de la imagen y se encarga de realizar el pre-procesamiento de la misma, para disminuir su tamaño previo a su transmisión.
- Cámara VGA, SVGA, con interface de conexión USB: Capta las imágenes de los vehículos estacionados en una zona de parqueo determinada.
- Dispositivo Xbee: Transmite de manera inalámbrica las imágenes captadas por el nodo sensor al nodo coordinador.
- MicroSD de 32GB: Almacena las imágenes captadas por la cámara

##### 4.1.2 Software

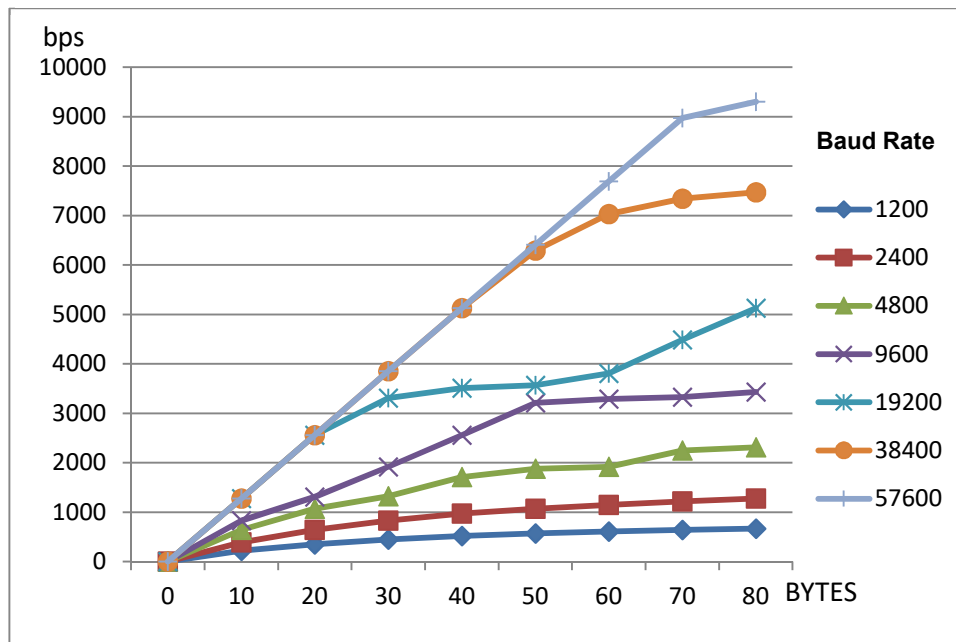
Los microcontroladores Arduino YUN, fueron actualizados con la última versión de la distribución de Linux OpenWrt y se instaló los drivers para el control de la cámara. El software para programar y cargar el programa al Arduino YUN es el Arduino IDE. El procesamiento de las imágenes se lo hace a través de un Cloud API. Todo el software utilizado es de código abierto y los dispositivos de transmisión inalámbrica operan en bandas no licenciadas.

#### 4.2 Pruebas de funcionamiento de la solución

La solución propuesta implementada a nivel de los nodos sensores de la red, utiliza tres Arduino YUN, con una cámara incorporada para captar las imágenes de los vehículos estacionados y un dispositivo Xbee para transmitir las imágenes al nodo coordinador. El nodo coordinador está formado por un Arduino YUN que tiene incorporado un dispositivo Xbee para recibir las imágenes de los nodos sensores que se encuentran distribuidos en la zona de parqueo.

La solución fue implementada haciendo uso de los dos modos de transmisión en los que pueden operar los dispositivos Xbee que son, el modo AT o transparente y el modo API.

En todas las pruebas de captura y transmisión de imágenes, las fotos son tomadas en formato JPG con una compresión del 75% y con una resolución de 320x240 pixel. La hoja de especificaciones técnicas de los dispositivos Xbee ZB indica, que estos dispositivos manejan una tasa de transferencia de 250 Kbps, sin embargo se realizó pruebas con diferentes tamaños de bytes transmitidos, con los Xbee conectados directamente a un computador haciendo uso del software XCTU y diferentes velocidades de la comunicación serial del microcontrolador al Xbee y la máxima tasa de transferencia que se obtuvo es de 9,3 Kbps, en la figura 4.1 se puede ver las gráficas correspondientes a lo indicado.



**Figura 4.1: Gráfica a diferentes Baud Rate y bytes transmitidos**

Debido a la baja tasa de transferencia de los dispositivos Xbee, El principal desafío es el de disminuir el tamaño de la imagen, sin perder calidad de imagen, para que pueda ser transmitida al nodo coordinador en un tiempo inferior a tres minutos y que en la imagen transmitida la aplicación reconozca la posición de los vehículos estacionados para que la solución propuesta sea viable.

Se realizó pruebas de funcionamiento con diferentes librerías externas para el manejo de los dispositivos Xbee, y éstas no permiten la comunicación serie con dichos dispositivos a velocidades mayores a 9600 bps, razón por la cual todas las pruebas fueron realizadas a una velocidad de 9600 bps entre el microcontrolador y el dispositivo Xbee.

La principal limitación para realizar las pruebas de campo, fue encontrar un estacionamiento funcional para colocar las cámaras que capten las imágenes de los vehículos y los dispositivos Xbee a una altura adecuada para que haya una buena comunicación. La altura requerida para posicionar los Xbee separados a una distancia de 120 metros es de aproximadamente 1,40 metros sin que haya obstáculos en la línea de vista entre el transmisor y receptor, por esa razón se realizó las pruebas ubicando unos postes en los vehículos para poder ubicar los Xbee a una altura de cerca de 3 metros para que los vehículos estacionados o el tránsito de las personas no interfieran con la señal transmitida. La figura 4.2 muestra la ubicación de un poste con un Xbee y un microcontrolador adaptado en un vehículo.



**Figura 4.2: Ubicación de Xbee a altura aproximada de 3 metros**

Las imágenes recibidas por el nodo coordinador, son enviadas a la Cloud API de Sighthound que se encarga de identificar los vehículos presentes en la imagen, entregando la coordenada de puntos de su ubicación, por esa razón es necesario una calibración inicial de las cámaras donde se determine la ubicación de los espacios de parqueo útiles, que serán procesados por el ordenador Raspberry.



A pesar que los dispositivos Xbee tienen la opción de encriptar los datos para darle seguridad a la información transmitida, no se consideró implementar esa opción debido a que para realizar el proceso de encriptación se debe usar 9 bytes de los datos útiles transmitidos, lo que implica que se reduzca el Payload y baje la velocidad del Throughput, y como la información que se transmite no se considerada crítica, en caso que pueda ser capturada por alguna persona, ya que son imágenes de vehículos estacionados en las áreas de parqueo de un lugar determinado.

#### **4.3 Pruebas de estrés de la solución**

Las pruebas de saturación de la solución desarrollada, se realizó mediante el incremento del frame de datos de 10 a 80 bytes considerando que el máximo tamaño del frame incluido la carga útil (Payload) soportado por el dispositivo Xbee ZB es de 84 bytes y de la variación del tiempo de espera para procesar el envío de la siguiente trama, se consideró una distancia de 120 metros entre el nodo sensor y nodo coordinador, que es la distancia teórica máxima alcanzada por los dispositivos Xbee utilizados y que en la pruebas de campo se validó que dichos equipos operan de manera satisfactoria a esa distancia. Las pruebas de estrés dieron como resultado el valor máximo del tamaño del frame y el tiempo mínimo de espera que debe tener el nodo sensor previo al envío de la siguiente trama que conforma la imagen capturada que permita al sistema operar de manera adecuada.

Debido a la baja tasa de transmisión con que operan los dispositivos Xbee, para la transmisión de las imágenes capturadas por los nodos sensores, se implementó el algoritmo Round Robin en los dos modos de operación del dispositivo inalámbrico AT y API, para que el canal no se vea afectado por la transmisión de dos o más dispositivos a la vez.

No se implementó una red multi-hop o multi-salto debido a que la distancia de cobertura entre el nodo sensor y nodo coordinador es apropiada para la implementación requerida y además se evita aumentar más delay a la red, para que esta sea más eficiente, sin embargo, se realizaron mediciones de delay en la red multi hop.

#### **4.4 Resultados obtenidos**

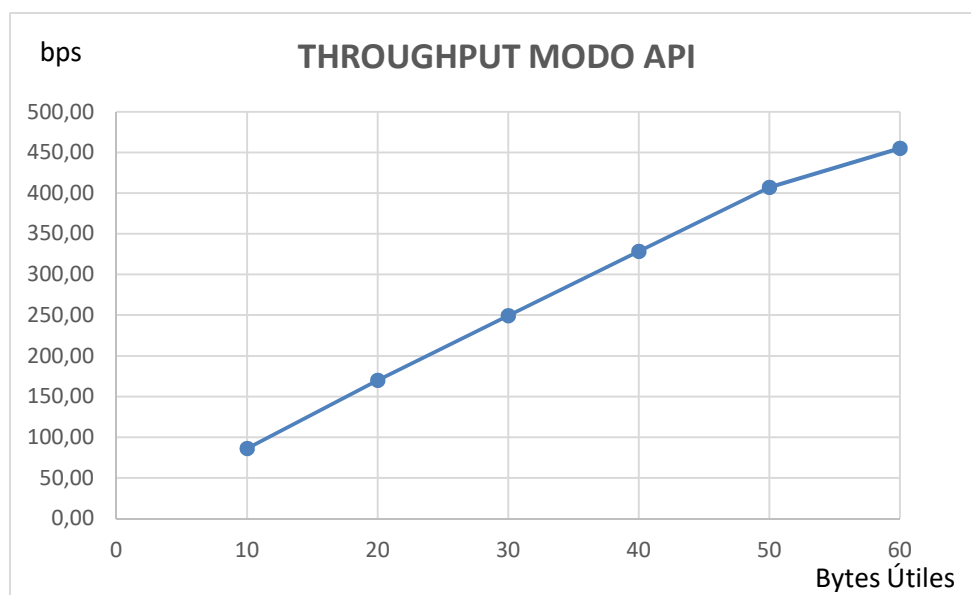
Además de las pruebas de campo realizadas para determinar el tamaño en bytes del frame óptimo que se debe transmitir y el tiempo de espera para el envío de un nuevo

frame de datos sin que se produzca pérdida de frame y el sistema opere normalmente, se realizó pruebas para medir el rendimiento de la red, calculando el Delay, Jitter, Throughput, RSSI y verificación de imágenes Transmitidas-Recibidas.

Para calcular el tamaño óptimo de bytes considerado como carga útil, con que puede operar el sistema propuesto, se realizó las pruebas transmitiendo las imágenes capturadas a una distancia máxima de 120 metros y a una distancia mínima de 20 metros, considerando que en ese rango de distancia estarían ubicados los nodos sensores respecto al nodo coordinador.

Previo al envío de una imagen, el nodo sensor la captura, le realiza un pre procesamiento para disminuir su tamaño y posteriormente el microcontrolador tiene que ir procesando la imagen y transmitirla en tramas que contienen una cierta cantidad de bytes de la imagen.

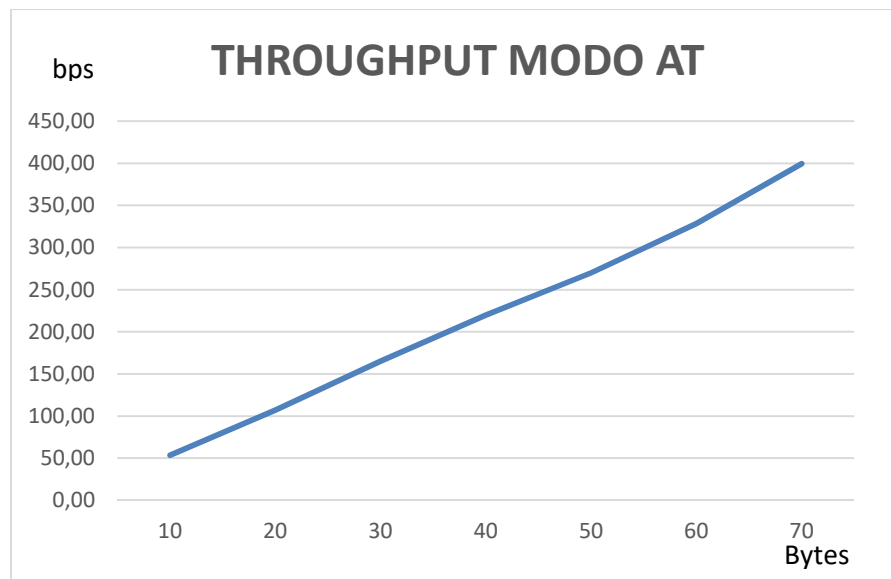
En la figura 4.3 se muestra el Throughput que se obtiene al ir aumentando el tamaño de bytes transmitidos, en esos bytes mostrados en la gráfica no se considera los bytes correspondientes a la carga no útil, pero que son transmitidos junto con la trama y que suman 18 bytes correspondientes a cabeceras, dirección de destino, checksum, etc.



**Figura 4.3: Throughput a diferentes Bytes Transmitidos**

Para el cálculo del Throughput utilizando el modo AT, se hizo también la variación del tamaño de bytes transmitidos, pero la principal dificultad en este modo es que no se tiene confirmación de los bytes transmitidos y si esos bytes fueron recibidos correctamente, normalmente el modo AT se usa para transmisiones punto a punto y en transmisiones de poca carga, pero no es recomendable utilizarlo en redes multipunto.

En la figura 4.4 se muestra el Throughput con la variación del tamaño de bytes transmitidos.



**Figura 4.4: Throughput a diferentes Bytes Transmitidos**

Se realizó mediciones RSSI en varias posiciones en el parqueo de la FIEC, colocando el nodo coordinador en un lugar aproximado al centro de ese parqueo en la ubicación GPS Latitud: -2.14466 y Longitud: -79.96681 y se fue ubicando el nodo sensor en varias posiciones alrededor del nodo coordinador, y se transmitieron las imágenes capturadas, las cuales fueron recibidas por el nodo coordinador sin pérdidas. La fuerza de la señal recibida (RSSI) en varios puntos fue óptima y esos resultados se muestran en la tabla 9 y en la figura 4.5 se encuentran esas ubicaciones en el mapa generado por Google de la ESPOL.

NÚMERO	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA (m)	RSSI (dBm)
1	-2.14426	-79.96714	60	-70
2	-2.14441	-79.96734	70	-66
3	-2.14451	-79.96724	50	-60
4	-2.14461	-79.967	20	-58

5	-2.14457	-79.96661	20	-61
6	-2.14412	-79.96674	60	-73
7	-2.14413	-79.96685	60	-68
8	-2.14419	-79.96688	50	-56
9	-2.14403	-79.96711	80	-65
10	-2.14387	-79.96756	120	-74
11	-2.14409	-79.96786	130	-72
12	-2.14494	-79.96685	30	-62
13	-2.145	-79.96706	50	-73
14	-2.14471	-79.96688	10	-58
15	-2.14422	-79.96724	70	-62
16	-2.14422	-79.96709	60	-60
17	-2.14434	-79.96702	40	-57
18	-2.14438	-79.96684	30	-48
19	-2.14427	-79.96695	50	-54
20	-2.14427	-79.96687	40	-59

**Tabla 9: Medición RSSI en varias ubicaciones Parqueo FIEC**

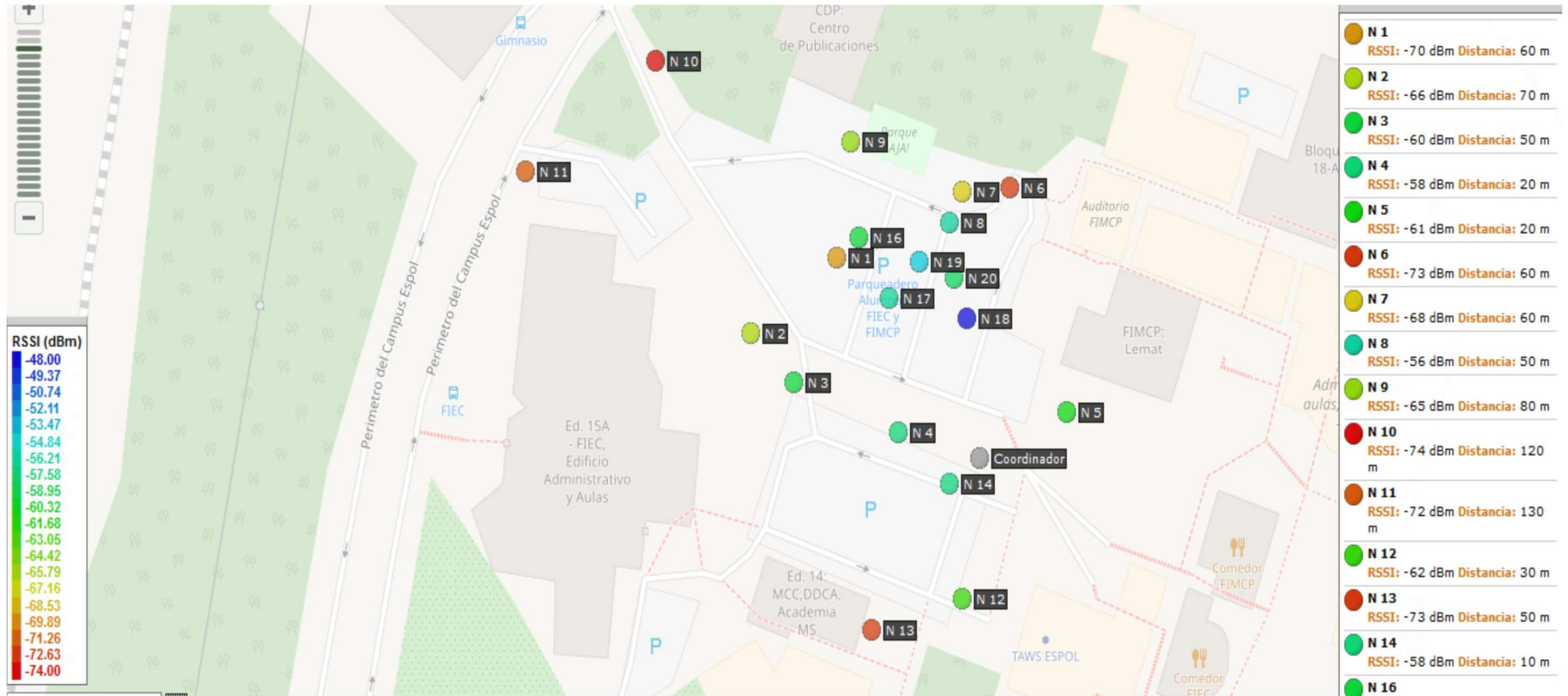
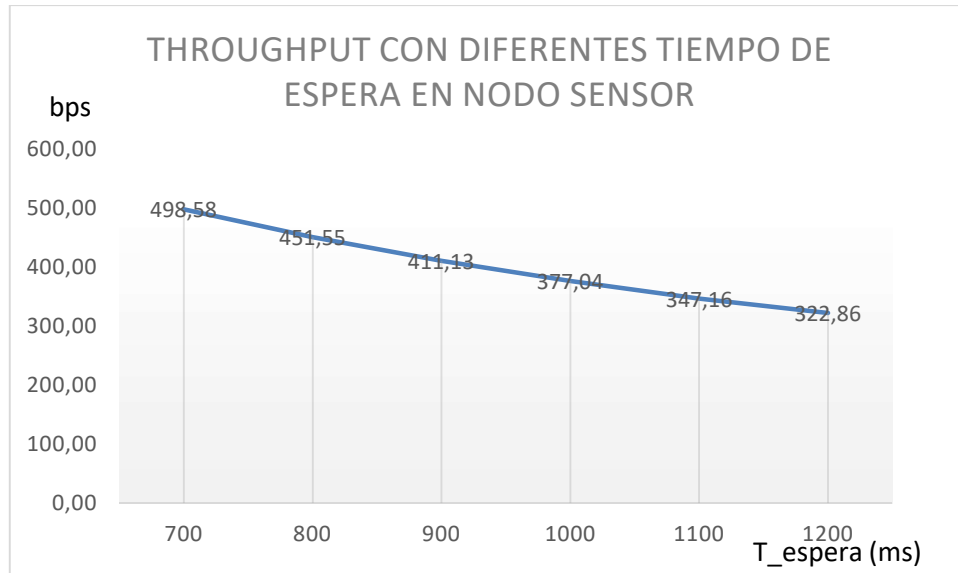


Figura 4.5: Ubicaciones de prueba RSSI de Nodos Sensores y Nodo Coordinador en Campus ESPOL

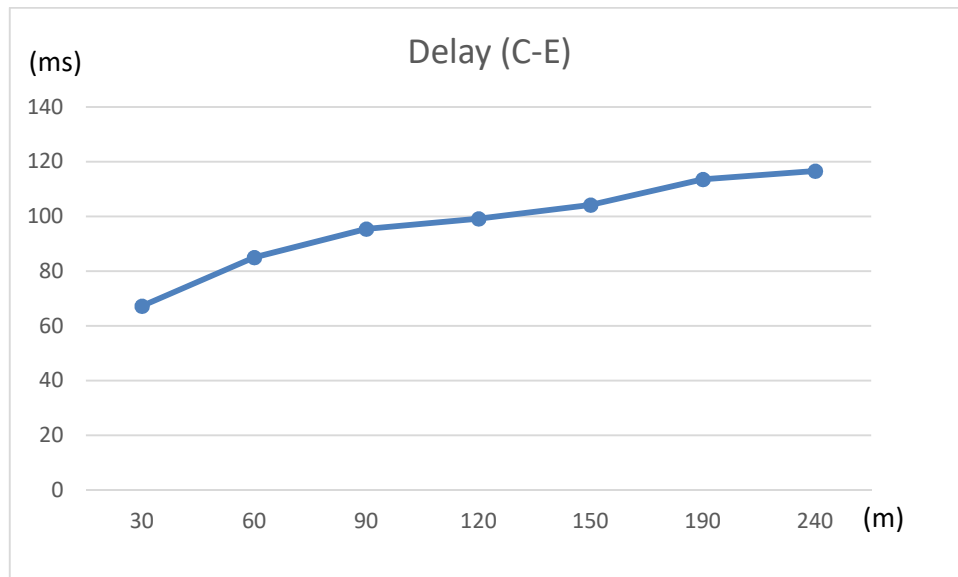
El nodo sensor al momento de enviar la imagen, debe de tener un tiempo de espera previo al envío de las siguientes tramas que componen la imagen capturada, para que esas tramas que se envíen al nodo coordinador lleguen de manera correcta, para que puedan ser procesadas. Cuando el tiempo de espera utilizado por el nodo sensor no es adecuado, la trama llega al coordinador mientras el coordinador está procesando otra trama, causando la pérdida de la trama y por tanto que la imagen recibida no sea correcta y el procesamiento posterior para determinar los espacios disponibles no dará los resultados esperados.

En la figura 4.6 se muestra el Throughput, con diferentes tiempos de espera para el envío de la siguiente trama, por parte del nodo sensor, obtenidos de manera experimental.



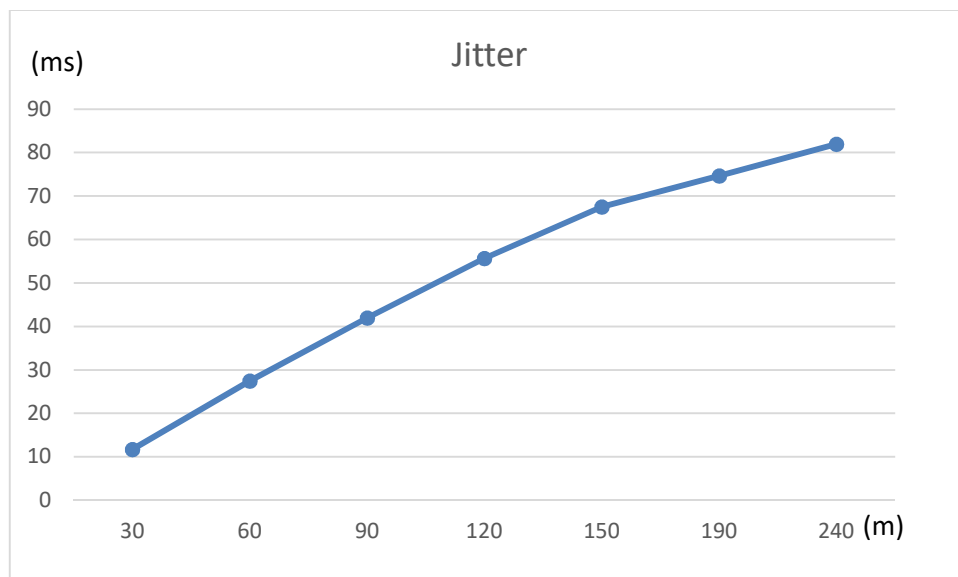
**Figura 4.6:** Throughput con diferentes tiempos de espera del nodo sensor

El cálculo del delay se obtuvo como un promedio del tiempo de llegada de las tramas desde en Nodo Sensor al Nodo Coordinador, durante la transmisión de la imagen, y se lo obtuvo variando la distancia entre los nodos. El delay obtenido es el delay normal de redes inalámbricas que está alrededor de los 60 ms, pero el resultado mostrado en la figura 4.7, es el tiempo promedio de delay al arribar todas las tramas que componen la imagen, transmitida por el nodo sensor al nodo coordinador. La Figura 4.10 muestra el escenario en el campus de la ESPOL donde se realizó las mediciones del delay y jitter.



**Figura 4.7: Cálculo del Delay entre el Nodo Sensor y Nodo Coordinador**

El Jitter considerado como la variación en el tiempo de llegada de las tramas, fue calculado como un promedio del tiempo transcurrido entre todas las llegadas de tramas que conforman la imagen capturada y se realizó pruebas variando la distancia entre el nodo sensor y el nodo coordinador. En la figura 4.8 se muestra los resultados obtenidos del jitter.

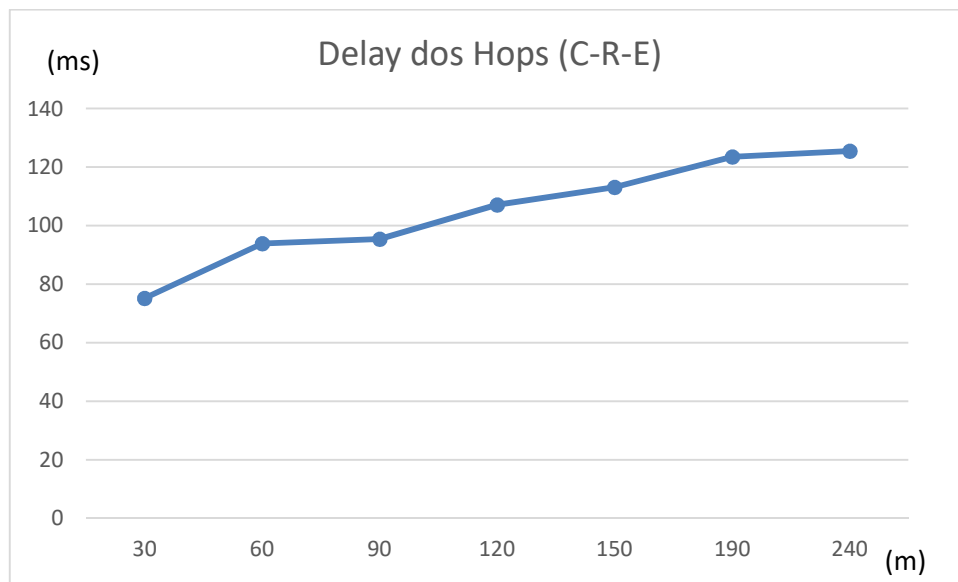


**Figura 4.8: Cálculo del Jitter entre el Nodo Sensor y Nodo Coordinador**

Los resultados obtenidos tanto del delay como del jitter, se deben principalmente a que el medio o canal inalámbrico se ve afectado por varios factores entre los que se destacan, las pérdidas por trayectoria, reflexión, absorción, refracción y dispersión,

ocurridos durante la propagación de la onda electromagnética.

Se realizó la prueba multi-hop aumentando un dispositivo Xbee configurado como Router, entre el Coordinador y el End Device para medir el delay desde el End Device al dispositivo coordinador. El resultado se muestra en la Figura 4.9, el dispositivo adicional aumenta un retardo de 8 a 11 ms al resultado medido directamente entre el nodo Coordinador y el End Device. El escenario fue el mismo de la figura 4.10



**Figura 4.9: Delay utilizando 2 Hops Coordinador-Router-End Device**

A pesar que este sistema está diseñado para ser utilizado en espacios públicos, que tienen servicio de energía eléctrica todo el tiempo, se realizó la medición de corriente para saber la potencia de consumo del nodo sensor y los resultados se encuentran en la tabla 10. El consumo del nodo coordinador es el que corresponde a la operación normal del Arduino YUN mostrado en la tabla 10.

	Operación Normal	Operación con Captura de Imagen
Amperios	0,531	0,7
Voltaje Operación	5	5
Potencia (VA)	2,655	3,5

**Tabla 10: Potencia de consumo Nodo Sensor**



Con el consumo que se indica, se puede encontrar celdas solares en el mercado, para utilizar la propuesta en otro tipo de aplicación en zonas rurales. No se consideró el cálculo de potencia del dispositivo Xbee porque su máxima corriente de operación es de 40 mA y su voltaje de operación es de 3.3 v, lo que da como resultado una potencia de 0,13 VA, que se puede considerar despreciable en comparación con el consumo del microcontrolador.



Figura 4.10: Ubicaciones de Nodos Sensores y Nodo Coordinador para pruebas de Delay y Jitter

#### 4.5 Análisis de resultados

De las pruebas realizadas se concluye que en modo API el tamaño máximo del frame que se puede transmitir es de 56 bytes, el mismo que sumado a la información de cabecera, dirección y de detección de errores que ocupa 18 bytes, alcanza un tamaño máximo de 74 bytes transmitidos, esto se da por limitaciones de las librerías utilizadas Software Serial y AltSoftSerial, ya que el tamaño teórico del frame que puede ser transmitido, de acuerdo a las especificaciones técnicas de los dispositivos Xbee es de 84 bytes.

El tiempo de espera para enviar la trama siguiente que compone la imagen, fue variando de manera decreciente desde 1200 ms hasta los 700 ms, verificando de manera experimental que no existan pérdidas de trama. El tiempo mínimo con el cual la imagen se transmite completamente sin que haya pérdidas de alguna trama es de 800 ms, ya que a un tiempo menor se pierden algunas tramas y no se puede recuperar la imagen de manera correcta.

Los valores obtenidos de RSSI en varias posiciones del parqueo de la FIEC en la ESPOL, cuyas distancias oscilan del nodo sensor al nodo coordinador de 20 a 130 metros, nos indican que el sistema propuesto se puede implementar en dicha ubicación ya que el margen entre la potencia recibida y la potencia de sensibilidad del Xbee colocado en el nodo coordinador es mayor a 10 dB.

Utilizando los valores experimentales obtenidos del tamaño de trama y del tiempo de retardo, se obtiene que el valor de Throughput máximo del sistema propuesto es de 451 bits/s, esa es la razón por la cual para que este sistema opere de manera óptima, las imágenes captadas por los nodos sensores, previo a ser transmitidas, deben ser pre procesadas para disminuir su tamaño sin perder mucha resolución de imagen, para que el nodo coordinador puede identificar de manera adecuada los vehículos presentes en esa imagen.

El modo AT o transparente con el que pueden operar los dispositivos Xbee también fue probado, pero no se pudo obtener una tasa de transmisión mayor que la obtenida en el modo API, y además tiene limitaciones para ser usado en redes multipunto. Para poderlos utilizar los nodos sensores fueron configurados con un nombre y el nodo

coordinador iba interactuando con ellos utilizando el algoritmo Round Robin, para que un nodo a la vez pueda enviar la imagen capturada y evitar la saturación del canal, el problema del trabajo en este modo es que todos los dispositivos sensores están procesando la señal transmitida por el nodo coordinador lo que provoca mayores consumos de energía.

Si bien se conoce que el delay y el jitter afectan el desempeño de las redes no orientadas a conexión, el prototipo desarrollado e implementado, no se ve afectado de manera significativa por estos factores, ya que al utilizar el algoritmo Round Robin para indicar que nodo sensor puede transmitir, solo un nodo sensor puede transmitir la imagen captada a la vez, y mientras el nodo sensor seleccionado está transmitiendo una imagen, el nodo coordinador solo procesa cada trama recibida hasta obtener la imagen completa enviada por el nodo sensor.

Las pruebas realizadas de transmisión de imágenes desde el nodo sensor al nodo coordinador, se hicieron a diferentes horas del día desde la mañana a la noche, a las diferentes temperaturas que existen en esos horarios, y los resultados que se obtuvieron no reflejaron ningún tipo de degradación de la señal durante la transmisión y recepción de la imagen y los valores de atenuación fueron similares.

Se realizó la captura de fotos de vehículos estacionados en zonas de estacionamiento por parte del nodo sensor y fueron transmitidos al nodo coordinador para luego ser comparadas con el software Octave, para verificar si la imagen recibida guarda relación con la imagen que se transmite. En la tabla 11 se muestra las dos pruebas que se realizaron que son de correlación para saber qué tan relacionadas están las imágenes originales que se envían, respecto a las recibidas por el nodo coordinador y el resultado es que las imágenes están cien por ciento relacionadas. También se realizó sobre las imágenes las pruebas de error cuadrático medio, para verificar el porcentaje de error que existe entre las imágenes transmitida y recibida. Los valores obtenidos fueron de cero, lo que significa que las imágenes recibidas no están alteradas respecto a las imágenes originales que se enviaron.

	Tamaño Imagen Tx (Bytes)	Tamaño Imagen Rx (Bytes)	Correlación Imagen Tx-Rx	Error Cuadrático Medio
<b>FOTO 1</b>	8106	8106	1	0
<b>FOTO 2</b>	13365	13365	1	0
<b>FOTO 3</b>	8320	8320	1	0
<b>FOTO 4</b>	9546	9546	1	0
<b>FOTO 5</b>	11411	11411	1	0
<b>FOTO 6</b>	14039	14039	1	0
<b>FOTO 7</b>	13837	13837	1	0
<b>FOTO 8</b>	17432	17432	1	0
<b>FOTO 9</b>	17558	17558	1	0
<b>FOTO 10</b>	17969	17969	1	0

**Tabla 11: Verificación de Imagen Recibida versus Imagen Transmitida**

Debido a que el formato JPG tiene un mayor nivel de compresión que el formato PNG, las imágenes capturadas para el proceso de detección de vehículos por el nodo sensor usan el formato JPG. Se realizó pruebas de capturas de imágenes en el formato PNG, pero el tiempo de transmisión de la imagen en gris en formato QVGA demora más de 10 minutos y en VGA 30 minutos. Si la imagen se captura a color los tiempos suben a 16 y 47 minutos en QVGA y VGA respectivamente, lo que hace inviable la funcionalidad del sistema propuesto.

En la tabla 12 se muestra los tamaños y tiempos de transmisión de las imágenes capturadas por el nodo sensor al nodo coordinador.

MODELO DE CÁMARA		IMAGEN			TAMAÑO EN BYTES				TIEMPO
LOGITECH WEBCAM PRO9000	LOGITECH WEBCAM C170	COLOR	GRIS	PNG	160x120	320x240 (QVGA)	352x288 (CIF)	640x480 (VGA)	Segundos
X		X		X	18014				335,14
X		X		X		53428			994,01
X		X		X			66680		1.240,56
X		X		X				153008	2.846,66
X			X	X	11314				210,49
X			X	X		34548			642,75
X			X	X			42339		787,70
X			X	X				96232	1.790,36
	X	X		X	20987				390,46
	X	X		X		61559			1.145,28
	X	X		X			76294		1.419,42
	X	X		X				205691	3.826,81

**Tabla 12: Tiempos de Transmisión en diferentes formatos de compresión PNG**

Las pruebas realizadas con captura y transmisión de imágenes en formato JPG, reducen significativamente los tiempos de transmisión, sin embargo, en los formatos de compresión más bajos de 25% y 50%, los vehículos no son detectados por la aplicación Cloud API, y por esa razón se utiliza el formato de compresión de 75%.

El tiempo promedio de transmisión de una imagen en formato JPG, con una compresión del 75% y en resolución QVGA está alrededor de los 3 minutos, el mismo que hace viable el desarrollo de la aplicación propuesta.

En la tabla 13 se muestra los tiempos de transmisión de las imágenes capturadas por los nodos sensores, a diferentes porcentajes de compresión y con varias resoluciones

MODELO DE CÁMARA			IMAGEN		FORMATO IMAGEN			TAMAÑO EN BYTES				TIEMPO
LOGITECH WEBCAM PRO9000	LOGITECH HD PRO WEBCAM C920	LOGITECH WEBCAM C170	COLOR	GRIS	JPG C.F 25	JPG C.F 50	JPG C.F 75	160x120	320x240 (QVGA)	352x288 (CIF)	640x480 (VGA)	( ms )
X			X		X			2134				36574
X			X		X				4532			73148
X			X		X					4743		81745
X			X		X						11233	204151
X			X			X		2908				42053

X			X			X			7123			119840
X			X			X				7435		124169
X			X			X					16314	271571
X			X				X	3678				58151
X			X				X		8694			147244
X			X				X			9376		167432
X			X				X				22911	379898
X				X	X			1569				29922
X				X	X				3506			63618
X				X	X					4076		74061
X				X	X						9430	169101
X				X		X		2213				43423
X				X		X			5152			92029
X				X		X				6233		112708
X				X		X					13657	247451
X				X			X	2761				50737
X				X			X		6602			118392
X				X			X			7912		141505
X				X			X				17643	314876
	X		X		X			2734				40323
	X		X		X				5434			80646
	X		X		X					6056		89745
	X		X		X						15233	242151
	X		X			X		3234				49053
	X		X			X			7923			122840
	X		X			X				8345		134169
	X		X			X					18314	320571
	X		X				X	4034				62151
	X		X				X		9045			167244
	X		X				X			9476		177432
	X		X				X				24911	391898
	X			X	X			1769				31922
	X			X	X				3706			65618
	X			X	X					4276		74061
	X			X	X						9630	189101
	X			X		X		2413				45423
	X			X		X			5352			94029
	X			X		X				6433		122708
	X			X		X					15657	267451
	X			X			X	2961				52737
	X			X			X		6802			128392

	X			X			X			8112		161505	
	X			X			X				19643	334876	
		X	X		X				1568			29741	
		X	X		X					3198		31989	
		X	X		X						3782	67167	
		X	X		X						8701	157079	
		X	X			X			2126			38183	
		X	X			X				7576		111782	
		X	X			X					5575	99978	
		X	X			X						12684	226483
		X	X				X		2959			53261	
		X	X				X			8337		133445	
		X	X				X				9061	161811	
		X	X				X					22408	399140
		X		X	X				1168			25741	
		X		X	X					1798		23989	
		X		X	X						3382	63167	
		X		X	X							8301	117079
		X		X		X			1726			34183	
		X		X		X				7176		89782	
		X		X		X					5175	95978	
		X		X		X						18684	353024
		X		X			X		2559			53261	
		X		X			X			7937		129445	
		X		X			X				8761	148021	
		X		X			X					18408	349140

**Tabla 13: Tiempos de transmisión en diferentes formatos de compresión JPG**

Utilizando la ecuación 2.6 para el cálculo de la precisión del sistema, considerando que cada espacio de parqueo dentro de la imagen es una unidad, se obtiene los siguientes resultados.

$$\text{Precisión del Sistema} = \frac{VP + VN}{VP + FP + VN + FN}$$

**VP = 320**

**FP = 0**

**FN = 38**

**VN = 116**

Con los valores indicados se obtiene una precisión del sistema del 92%. Vale destacar que, en la mayoría de los casos de no detección de vehículos, corresponde a



imágenes con poca luz o mal captadas y el sistema en ningún caso determino que había algún vehículo en un espacio de parqueo vacío, por esa razón el valor de FP es igual a cero.

## CONCLUSIONES

La implementación planteada para dar solución a la problemática de gestión de aparcamientos en espacios abiertos, se realizó utilizando equipos microcontroladores de bajo costo, bajo procesamiento y bajo consumo energético, a pesar que el consumo de energía no es un tema crítico en el trabajo propuesto, porque el sistema por su funcionalidad se utiliza en sectores como vía pública, campus académicos o centros comerciales donde no existe inconvenientes para alimentar los nodos sensores y los nodos coordinadores. Los dispositivos Xbee ZB que se utilizan para formar la red de sensores, también son de bajo costo, baja transferencia de datos y de corto alcance, a pesar que existe en el mercado dispositivos del mismo tipo de características que pueden alcanzar distancias de hasta 3 Km, incrementando la potencia de TX del dispositivo.

Si la problemática planteada es viable atenderla con los equipos y dispositivos descritos, será mucho más factible desarrollarla con equipos y dispositivos de mayor capacidad de procesamiento y mayores tasas de transferencia, ya que la solución se basa en la captura de imágenes por parte de los nodos sensores distribuidos en los espacios de parqueos, a las que se le realiza un pre procesamiento inicial para disminuir el tamaño de la imagen sin perder mucha resolución, y es transmitida al nodo coordinador que recibe la imagen y la envía a la Cloud API de Sighthound, que realiza el procesamiento de la imagen y determina que parte de las imágenes son vehículos y devuelve como respuesta a la consulta cuatro pares ordenados (ubicación pixel horizontal, ubicación pixel vertical) de puntos de la imagen con los cuales el nodo coordinador determina si un espacio de parqueo está libre u ocupado.

La solución planteada a un tema específico de gestión de aparcamientos, puede ser utilizada para la atención de otros problemas existentes en otros campos, como por ejemplo en la agricultura, que en ocasiones se requiere obtener los niveles de clorofila de las plantas o su hidratación, para conocer la salud de la planta a través del uso de cámaras multiespectrales o térmicas, que capturan la imagen por medio de un nodo sensor y puede ser transmitida a un nodo coordinador para su análisis. En esos ambientes rurales es importante el consumo energético, ya que la mayoría de las veces no se cuenta siempre con fuentes de energía como existe en zonas urbanas, y al utilizar dispositivos de bajo consumo, pueden ser alimentados con celdas solares para que tengan autonomía y se

puede ralentizar la captura y envío de imágenes de acuerdo al cumplimiento de ciertas condiciones ambientales para una mejor conservación de la energía.

## RECOMENDACIONES

Para la implementación de este trabajo se utilizó dispositivos Arduino YUN, cámaras RGB y dispositivos Xbee ZB, el mismo puede ser mejorado utilizando microcomputadoras de bajo costo, pero de mayor capacidad de procesamiento como los Raspberry Pi, BeagleBone, CubieBoard, etc, con los cuales se puede hacer un mejor pre-procesamiento de la imagen antes de transmitirla al nodo coordinador.

El reconocimiento de espacios libres y ocupados utiliza el Cloud API de Sighthound, pero existe una biblioteca de código abierto denominada por sus creadores como TensorFlow, que fue desarrollada y posteriormente liberada bajo licencia de código abierto por el equipo de Google y tiene entre otras características el reconocimiento de objetos, entre ellos de vehículos que puede ser aplicado a un nuevo proyecto.

En el Ecuador tenemos dos estaciones climáticas bien definidas que son invierno y verano, durante todo el tiempo que se realizaron las pruebas coincidió con la estación de verano, razón por la cual todas las pruebas fueron realizadas sin presencia de lluvia. Se debe probar el sistema en condiciones de clima lluvioso, para verificar si las imágenes captadas de los vehículos por las cámaras instaladas en los nodos sensores, pueden ser procesadas de manera correcta por la Cloud API de Sighthound. En cuanto a la transmisión de imágenes con precipitaciones de lluvia, considerando que la frecuencia de operación de los Xbee es de 2.4 GHz, no debería existir problemas con el envío y recepción de las imágenes, ya que se conoce que la lluvia afecta de manera significativa a los enlaces que operan a frecuencias superiores a los 10 GHz que sufren atenuaciones por los gases atmosféricos.

En vista que las librerías utilizadas para la comunicación serial con los dispositivos de transmisión Xbee, no permitieron operar a velocidades mayores a 9.600 bps, se puede investigar y modificarlas para que se pueda incrementar la velocidad de comunicación serial entre el dispositivo Xbee y el microcontrolador, lo que incrementaría el Throughput de los nodos sensores durante la transmisión de la imagen capturada, mejorando de manera significativa el rendimiento de la red de sensores.

Para este proyecto no era necesario implementar una red multi-salto, ya que la red de

sensores propuesta ubica el nodo coordinador en el medio de la red y los nodos sensores alrededor de él, lo que permite abarcar un área aproximada de 240 metros. Se debe realizar pruebas para conocer el tiempo de retardo adicional que se incrementa en la red de sensores debido al multi-salto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. M. A. Fahmy, *Wireless sensor networks: concepts, applications, experimentation and analysis*. 2016.
- [2] H. M. Ammari, Ed., *The art of wireless sensor networks. Vol. 2: Advanced topics and applications*. Heidelberg: Springer, 2014.
- [3] K. Sohraby, D. Minoli, y T. F. Znati, *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2007.
- [4] J. Yick, B. Mukherjee, y D. Ghosal, «Wireless sensor network survey», *COMPANW Computer Networks*, vol. 52, n.º 12, pp. 2292-2330, 2008.
- [5] G. Ferrari, Ed., *Sensor networks: where theory meets practice*. Heidelberg ; New York: Springer, 2010.
- [6] I. Akyildiz, T. Melodia, y K. Chowdury, «Wireless multimedia sensor networks: A survey», *IEEE Wireless Communications*, vol. 14, n.º 6, pp. 32-39, dic. 2007.
- [7] M. Di Francesco, S. K. Das, y G. Anastasi, «Data Collection in Wireless Sensor Networks with Mobile Elements: A Survey», *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 8, n.º 1, pp. 1-31, ago. 2011.
- [8] F. Zhao y L. J. Guibas, *Wireless sensor networks: an information processing approach*. Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2008.
- [9] E. Dishman, «Inventing Wellness Systems for Aging in Place», *Computer*, vol. 37, n.º 5, pp. 34–41, may 2004.
- [10] N. A. Alrajeh, S. Khan, y A.-S. K. Pathan, *Wireless sensor networks: current status and future trends*, Online-Ausg. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.
- [11] D. Bhattacharyya, T. Kim, y S. Pal, «A Comparative Study of Wireless Sensor Networks and Their Routing Protocols», *Sensors*, vol. 10, n.º 12, pp. 10506-10523, nov. 2010.
- [12] D. Gislason, *Zigbee Wireless Networking*. 2008.
- [13] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. Newnes, 2011.
- [14] H. Labiod, H. Afifi, y C. de Santis, *Wi-Fi™, Bluetooth™, Zigbee™ and WiMax™*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [15] F. Eady, *Hands-On ZigBee: Implementing 802.15.4 with Microcontrollers*. Elsevier, 2010.
- [16] C. Wang, T. Jiang, y Q. Zhang, *ZigBee network protocols and applications*. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis, 2014.
- [17] D. A. Gratton, *The Handbook of Personal Area Networking Technologies and Protocols*. Cambridge University Press, 2013.
- [18] S. Tennina et al., *IEEE 802.15.4 and ZigBee as Enabling Technologies for Low-Power Wireless Systems with Quality-of-Service Constraints*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [19] A. V. Räsänen y A. Lehto, *Radio Engineering for Wireless Communication and Sensor Applications*. Artech House, 2003.
- [20] W. Stallings, *Comunicaciones y redes de computadores*, Edición: 7. Madrid: ALHAMBRA, 2004.
- [21] G. Shi y K. Li, *Signal Interference in WiFi and ZigBee Networks*. 2017.
- [22] R. Faludi, *Building wireless sensor networks: [a practical guide to the ZigBee Mesh networking protocol]*, 1. ed. Beijing: O'Reilly, 2011.
- [23] «Zigbee Certified Products | Zigbee Alliance». .
- [24] A. Allan y K. Bradford, *Distributed Network Data*. O'Reilly Media, Inc., 2013.
- [25] J. A. Titus, *The hands-on XBEE lab manual: experiments that teach you XBEE wireless communications*. Burlington: Elsevier Science, 2012.

- [26]R. E. Ziemer y W. H. Tranter, *Principles of Communications*. Wiley, 2014.
- [27]R. K. Crane, *Propagation Handbook for Wireless Communication System Design*, 1 edition. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [28]J. M. González-Martín, A. J. Sánchez-Medina, y J. B. Alonso, «Optimización de la predicción de problemas financieros en empresas sanitarias privadas españolas aplicando algoritmos genéticos», *Gaceta Sanitaria*, ago. 2018.
- [29]B. Wang, *Coverage control in sensor networks*. London: Springer, 2010.
- [30]A. Kurniawan, *Raspberry Pi Wireless Networks*. 2015.
- [31]A. K. Dennis, *Raspberry Pi Computer Architecture Essentials*. Packt Publishing Ltd, 2016.
- [32]E. Upton, J. Duntemann, R. Roberts, B. Everard, y T. Mamtora, *Learning Computer Architecture with Raspberry Pi*. John Wiley & Sons, 2016.
- [33]A. Kurniawan, *Getting Started with Arduino and Go*. 2015.
- [34]R. Blum, *Arduino Programming in 24 Hours, Sams Teach Yourself*. Sams Publishing, 2014.
- [35]R. Singh, A. Gehlot, B. Singh, y S. Choudhury, *Arduino-Based Embedded Systems: Interfacing, Simulation, and LabVIEW GUI*. CRC Press, 2017.
- [36]J. Bayle, *C Programming for Arduino*. Packt Publishing Ltd, 2013.
- [37]Ó. T. Artero, *Arduino : curso práctico de formación*. RC Libros, 2013.
- [38]J. Blum, *Exploring Arduino: tools and techniques for engineering wizardry*. Indianapolis, Ind.: Wiley, 2013.

## ANEXOS

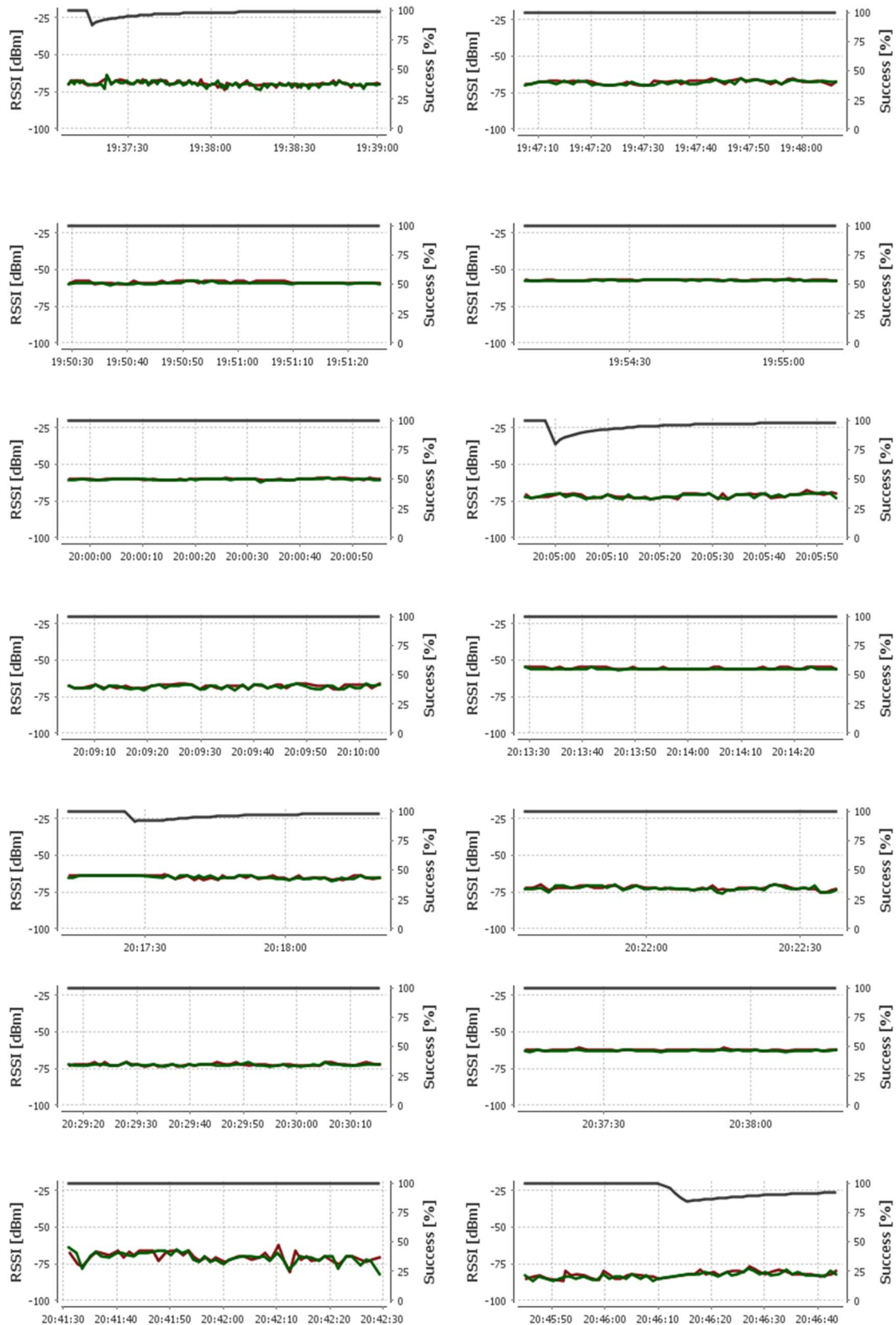
### ANEXO A: ABREVIATURAS

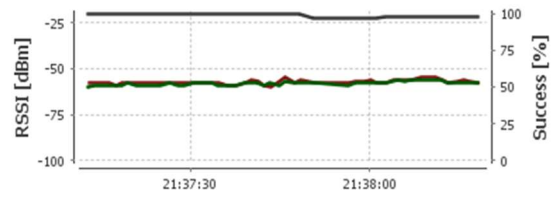
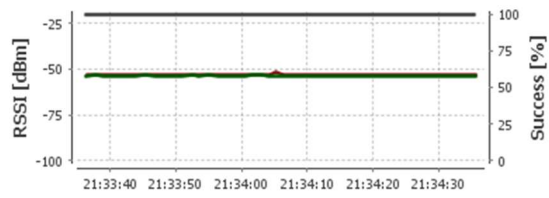
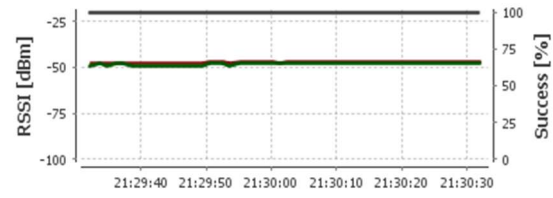
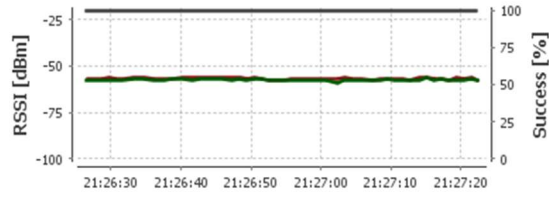
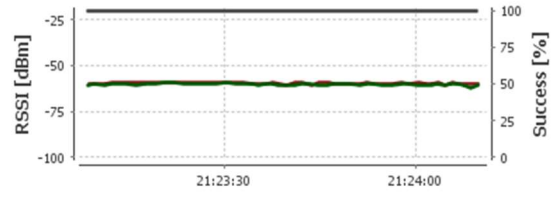
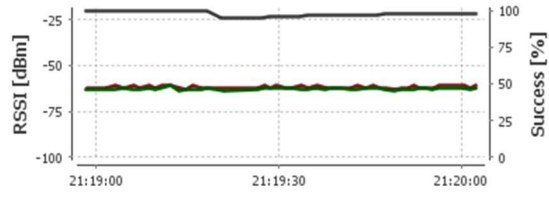
APS	Application Support Sub layer
AV	Audio Video
AVR	Alf and Vegard's Risc architecture
BAN	Body Area Network
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CS	Carrier Sense
CCA	Clear Channel Assessment
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
FFD	Full Function Devices
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSL	Free Space Loss
GPIO	General Purpose Input Output
GTS	Guaranteed Time Slot
HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning
I2C	Inter-Integrated Circuit
ICSP	In Circuit Serial Programming
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial Scientific and Medical
LAN	Local Area Network
LOS	Line Of Sight
LQI	Link Quality Indication
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network
MAC	Media Access Control
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In



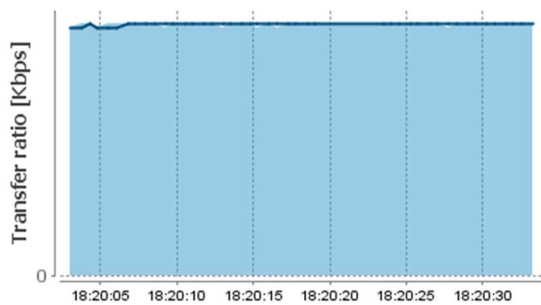
NS	Network Sensor
OEM	Original Equipment Manufacturer
O-QPSK	Orthogonal Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open System Interconnection
PAN	Personal Area Network
PHY	Physical Layer
RFD	Reduced Function Devices
RFID	Radio Frequency Identification
SAP	Service Access Point
SCL	Serial Clock
SDL	Serial Data Line
SOC	System On Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SS	Slave Select
TTL	Transistor -Transistor Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UASN	Underwater Acoustic Sensor Network
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WMSN	Wireless Multimedia Sensor Network
WSN	Wireless Sensor Network
WSUN	Wireless Sensor Underground Network
XCTU	Xbee Configuration and Test Utility
ZC	Zigbee Coordinator
ZDO	Zigbee Device Object
ZED	Zigbee End Device
ZR	Zigbee Router

## ANEXO B: MEDICIÓN RSSI EN PARQUEO FIEC DE ESPOL

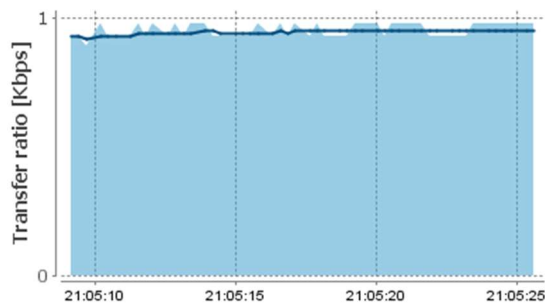




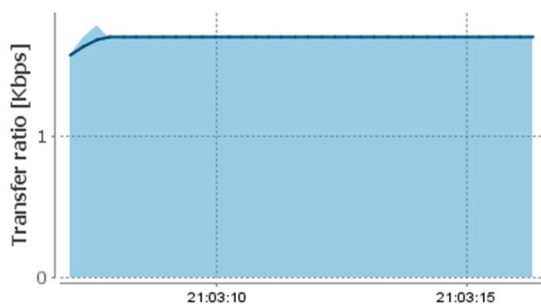
## ANEXO C: THROUGHPUT A VARIOS BAUD RATE Y 40 BYTES TX



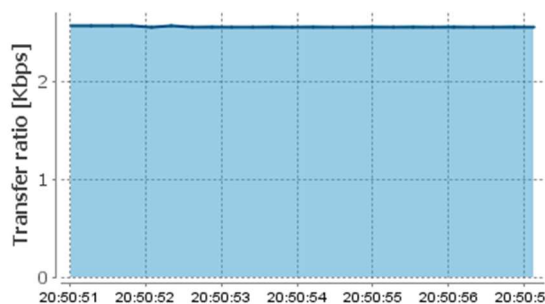
Baud Rate: 1.200 bps



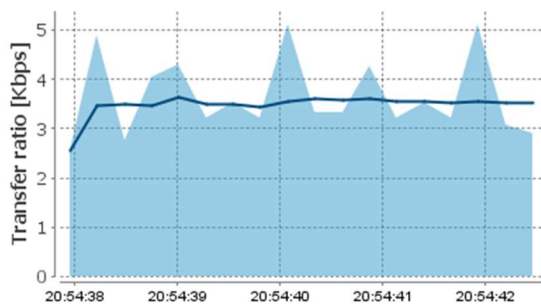
Baud Rate: 2.400 bps



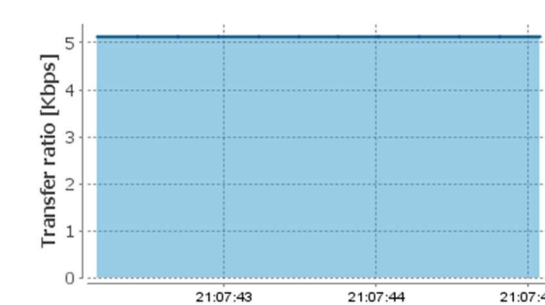
Baud Rate: 4.800 bps



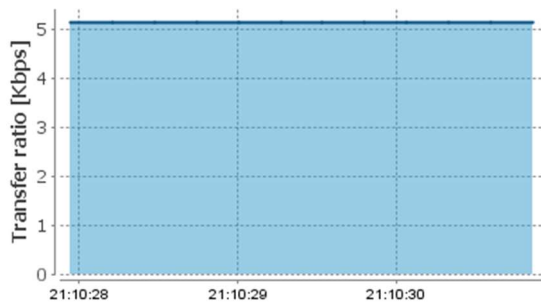
Baud Rate: 9.600 bps



Baud Rate: 19.200 bps



Baud Rate: 38.400 bps



Baud Rate: 57.600 bps

## ANEXO D: DETECCIÓN DE ESPACIOS OCUPADOS USANDO CLOUD API DE SIGHTHOUND





## ANEXO E: COMPARACIÓN DE IMÁGENES TRANSMITIDAS Y RECIBIDAS UTILIZANDO OCTAVE



Foto1 Transmitida por Nodo Sensor



Foto1 Recibida por Nodo Coordinador



Foto2 Transmitida por Nodo Sensor



Foto2 Recibida por Nodo Coordinador



Foto3 Transmitida por Nodo Sensor



Foto3 Recibida por Nodo Coordinador



Foto4 Transmitida por Nodo Sensor



Foto4 Recibida por Nodo Coordinador



Foto5 Transmitida por Nodo Sensor



Foto5 Recibida por Nodo Coordinador



Foto6 Transmitida por Nodo Sensor



Foto6 Recibida por Nodo Coordinador