

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

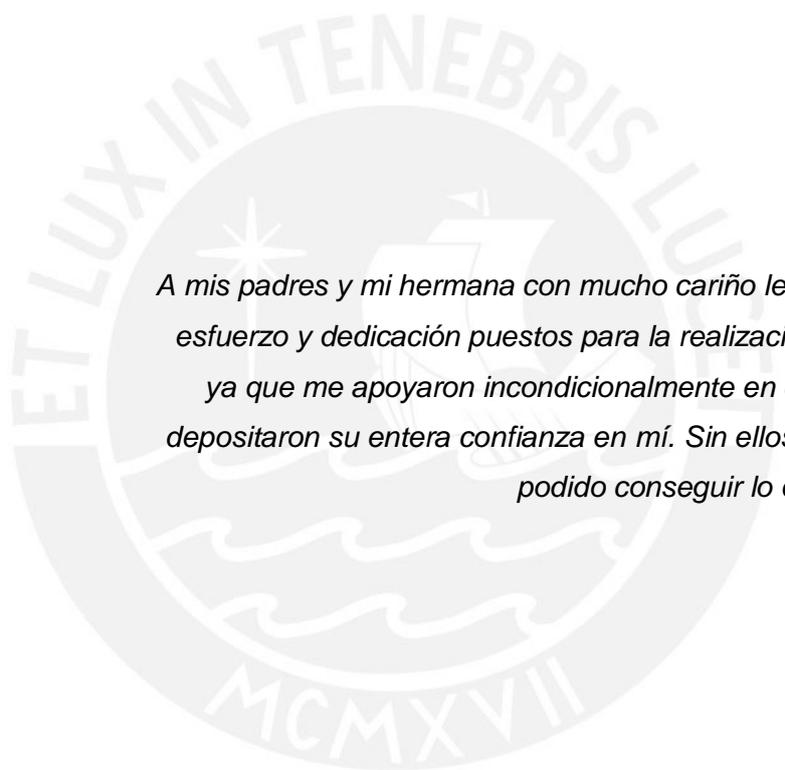
**DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA
EL MONITOREO DE LA DISPONIBILIDAD DE ESPACIOS EN
UN ESTACIONAMIENTO VEHICULAR DE UNA UNIVERSIDAD**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Electrónico**, que presenta el bachiller:

Piero Rivera Ramírez

ASESOR: Amanda Cáceres Mari, PhD.

Lima, setiembre de 2018



A mis padres y mi hermana con mucho cariño les dedico todo mi esfuerzo y dedicación puestos para la realización de esta tesis, ya que me apoyaron incondicionalmente en cada momento y depositaron su entera confianza en mí. Sin ellos, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora.

RESUMEN

En toda ciudad la disponibilidad y oferta del servicio de estacionamientos es vital ya que contribuye a la dinámica del tránsito en general facilitando, de esta manera, fluidez y acceso a los diferentes destinos de los usuarios de vehículos. En la ciudad de Lima, sin embargo, existe un marcado déficit de espacios destinados al aparcamiento vehicular como consecuencia del crecimiento del parque automotor y la ausencia de un plan de ordenamiento vial. Estos aspectos se han convertido en todo un reto en materia de políticas públicas que involucran a los conductores de vehículos de la ciudad de Lima Metropolitana. La ausencia de la ciencia aplicada a la regulación urbanística, del mismo modo, ha contribuido al retraso tecnológico de la ciudad en esta materia.

El objetivo de la tesis es diseñar un sistema de monitoreo de espacios disponibles de un aparcamiento vehicular de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), basado en redes inalámbricas de sensores. El propósito de este sistema es recolectar información sobre la disponibilidad de los espacios de estacionamiento al aire libre, la cual será accesible a los usuarios de manera que permita conseguir una plaza con cierta facilidad.

Técnicamente, para la consecución del objetivo general de la investigación, se tomó la decisión de utilizar la tecnología ZigBee de entre una gama de protocolos de comunicación inalámbrica, considerando su simplicidad, su provechoso ahorro de energía y su bajo costo. Previamente, se llevó a cabo un estudio para la elección de los instrumentos y el *software* más viables (sensores, microcontroladores y gestores de bases de datos), aspectos que guardaron relación con el propósito y la temporalidad del desarrollo de la investigación. Cabe mencionar que el sistema está enfocado en el ahorro de energía, por lo que se ha considerado esencialmente instrumentos y métodos de bajo consumo de corriente para la longevidad de los dispositivos.

Los resultados de las pruebas ejecutadas en la investigación concluyen en que el sistema de monitoreo diseñado basado en una red inalámbrica de sensores es una alternativa viable para optimizar y dinamizar el tránsito vehicular del campus de la PUCP. Así, su aplicación podría ser extrapolada a otros escenarios de la ciudad para contribuir, de esta manera, en el ordenamiento del sector transporte de la ciudad.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
LISTA DE ANEXOS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 PROBLEMÁTICA EN LOS ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES ...	2
1.1. Contexto internacional.....	2
1.2. Contexto local.....	3
1.3. Contexto organizacional.....	4
1.4. Declaración del marco problemático.....	6
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES.....	8
2.1. Síntesis del asunto de estudio.....	8
2.2. Antecedentes.....	8
2.3. Fundamentos teóricos.....	10
2.3.1. Redes inalámbricas de sensores.....	10
2.3.2. Monitoreo de espacios de estacionamiento.....	16
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES.....	20
3.1. Universo y muestra.....	20
3.2. Objetivos de la investigación.....	21
3.2.1. Objetivo general.....	21
3.2.2. Objetivos específicos.....	21
3.3. Requerimientos.....	21
3.4. Comparación de proveedores.....	22
3.4.1. Módulos ZigBee.....	22
3.4.2. Sensores.....	23
3.4.3. Microcontroladores.....	26
3.4.4. Gestores de bases de datos.....	27
3.4.5. IDE para el desarrollo del servicio web.....	28

CAPÍTULO 4 DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA UN ESTACIONAMIENTO	29
4.1. Matemática.....	29
4.1.1. Canales de frecuencias en ZigBee	29
4.1.2. Atenuación de señales y estimación de rango	29
4.1.3. Capacidad de carga eléctrica	30
4.2. Análisis del sistema	30
4.2.1. Datos de entrada	30
4.2.2. Datos de salida.....	30
4.2.3. Análisis de los elementos de diseño	31
4.3. Cálculos de diseño	41
4.3.1. Diseño y funcionamiento	41
4.3.2. Modelamiento y ubicación de los componentes.....	46
4.4. Simulación y Pruebas	48
4.4.1. Configuración de módulos XBee.....	48
4.4.2. Configuración del <i>software</i> de gestión	55
4.4.3. Pruebas de comunicación.....	56
4.5. Costo de inversión.....	58
4.6. Comparación de presupuestos	60
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de la ubicación del campus principal de la PUCP. [13].....	5
Figura 1.2. Ubicación del estacionamiento K en el campus principal de la PUCP. [13]	5
Figura 1.3. Estacionamiento K de la PUCP. [15].....	6
Figura 1.4. Dimensiones del estacionamiento K. [Elaboración propia]	6
Figura 2.1. Sensor dual Sensit IR. [17]	9
Figura 2.2. <i>Display</i> informativo de la disponibilidad de espacios de estacionamiento en tiempo real. [18].....	10
Figura 2.3. Topologías de red: Estrella, árbol y malla (de izquierda a derecha). [25]	12
Figura 2.4. Modelos referencias de la pila OSI y la pila del IEEE 802. [27]	12
Figura 2.5. Especificaciones detalladas de la capa física y la capa de enlace del estándar IEEE 802.15.4. [29].....	13
Figura 2.6. Gráfico de Tasa de transferencia vs. Rango, en el que se incluyen varias tecnologías inalámbricas. [31].....	14
Figura 2.7. Especificaciones detalladas de la capa de red y la capa de aplicación del protocolo ZigBee. [29].....	15
Figura 3.1. Funcionamiento de un sensor ultrasonido. [40].....	25
Figura 3.2. Campo magnético de la Tierra afectado por un vehículo mediano. [43]	25
Figura 4.1. Arquitectura de un nodo sensor. [Elaboración propia]	32
Figura 4.2. Especificaciones del módulo XBee S2C. [Elaboración Propia].....	33
Figura 4.3. Tipos de antenas en módulos XBee. [48].....	34
Figura 4.4. Especificaciones del módulo HC-SR04. [Elaboración Propia]	35
Figura 4.5. Especificaciones del circuito integrado HMC5883L. [Elaboración Propia]	36
Figura 4.6. Especificaciones del microcontrolador ATMEGA328. [Elaboración Propia]	37
Figura 4.7. Especificaciones del regulador MCP1702. [Elaboración Propia]	38

Figura 4.8. Arquitectura de la central de monitoreo. [Elaboración propia]	38
Figura 4.9. Conexión entre el XBee Coordinador y una PC. [Elaboración Propia]..	39
Figura 4.10. Arquitectura del display. [Elaboración propia]	40
Figura 4.11. Especificaciones del display de 7-segmentos de 6.5" de SparkFun. [Elaboración Propia]	40
Figura 4.12. Diagrama del sistema de monitoreo de espacios de estacionamiento. [Elaboración Propia]	41
Figura 4.13. Esquemático de los sensores HC-SR04 y HMC5883L. [Elaboración propia]	43
Figura 4.14. Esquemático de la tarjeta principal. [Elaboración propia]	44
Figura 4.15. Modelo de la ubicación del sensor debajo del vehículo y al centro de la plaza. [Elaboración propia]	46
Figura 4.16. Modelo 3D del nodo sensor. [Elaboración Propia].....	47
Figura 4.17. Modelo del estacionamiento con la ubicación de la estación de monitoreo (cabina azul). [Elaboración propia].....	47
Figura 4.18. Modelo del <i>display</i> en la entrada del estacionamiento. [Elaboración propia]	48
Figura 4.19. Trama API. [48].....	49
Figura 4.20. Especificaciones XBee y XBee PRO. [48].....	51
Figura 4.21 Distribución de los elementos de red para la simulación. [Elaboración Propia].....	54
Figura 4.22. Diagrama del <i>software</i> de gestión de datos en el servidor. [Elaboración Propia].....	55
Figura 4.23. Resultados de las lecturas de datos del coordinador XBee. [Elaboración Propia].....	56
Figura 4.24. Página web de prueba de los dos estacionamientos. [Elaboración Propia]	56
Figura 4.25. Tramas API de transmisión y recepción. [Elaboración Propia]	57
Figura 4.26. Pruebas de conectividad de los módulos XBee. [Elaboración Propia]	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Problemas debido al déficit de estacionamientos. [Elaboración propia]...	4
Tabla 1.2. Hechos y problemas en la Pontificia Universidad Católica del Perú. [Elaboración propia].....	7
Tabla 2.1. Conjunto de frecuencias que pertenecen a las bandas ISM. [28]	13
Tabla 2.2. Comparación entre los protocolos WiFi, Bluetooth, UWB y ZigBee. [35]	16
Tabla 3.1. Comparación entre módulos ZigBee de los proveedores Anaren, Atmel, CEL y Digi International. [38]	23
Tabla 3.2. Comparación entre los módulos de sensores ultrasónicos. [41].....	24
Tabla 3.3. Comparación entre sensores magnéticos. [41]	26
Tabla 3.4. Comparación entre microcontroladores de ATMEL. [41]	27
Tabla 3.5. Comparación entre gestores de bases de datos. [44]	27
Tabla 3.6. Comparación entre ambientes de desarrollo integrado web. [45].....	28
Tabla 4.1. Estados posibles en un espacio de estacionamiento. [Elaboración propia]	31
Tabla 4.2. Distancia entre un sensor y un vehículo vs. Variación de CM del vehículo. [50]	36
Tabla 4.3. Cálculo del consumo promedio de corriente en un nodo sensor. [Elaboración Propia]	45
Tabla 4.4. Configuración de los módulos XBee en XCTU. [Elaboración Propia]	50
Tabla 4.5. Resultados de las pruebas RSSI en el estacionamiento K. [Elaboración Propia].....	53
Tabla 4.6. Tramas recibidas por el coordinador con el estado de los estacionamientos. [Elaboración Propia].....	57
Tabla 4.7. Tramas recibidas en el display con el cambio de estado y el tipo de estacionamiento. [Elaboración Propia].....	58
Tabla 4.8. Presupuesto para el desarrollo del sistema de monitoreo. [Elaboración Propia].....	59
Tabla 4.9. Presupuesto de un nodo sensor. [Elaboración Propia].....	60

LISTA DE ANEXOS

(CD ADJUNTO)

- Anexo 1: Código en Lenguaje C en el *software* Atmel Studio.
- Anexo 2: Código en Lenguaje Java en el *software* IntelliJ IDEA.
- Anexo 3: Código en Lenguaje JSP en el *software* IntelliJ IDEA.
- Anexo 4: Código en Arduino IDE.
- Anexo 5: Diagramas de flujo.
- Anexo 6: Diagrama de bloques del diseño de red para la simulación.
- Anexo 7: Diagramas de conexiones.
- Anexo 8: Esquemáticos.
- Anexo 9: Hojas de datos de los dispositivos empleados.
- Anexo 10: Documentación XBee.
- Anexo 11: Modelamiento 3D en SketchUp.
- Anexo 12: Pruebas RSSI en XCTU.
- Anexo 13: Pruebas de conectividad en XCTU.
- Anexo 14: Otros proveedores de sensores para estacionamiento.

INTRODUCCIÓN

El problema del ordenamiento vial de la ciudad de Lima obedece a varios factores, algunos de ellos relacionados al déficit de la gestión municipal focalizada en el sector transporte, la visión de futuro y el crecimiento poco sostenido y desordenado del parque automotor de la ciudad capital. Otro de ellos está referido a la escasa utilización de la tecnología moderna aplicada al sector urbano, como en el caso de los estacionamientos vehiculares.

El objetivo de la investigación es diseñar una red inalámbrica de sensores aplicada al servicio de estacionamiento en la Pontificia Universidad Católica del Perú para el monitoreo de la disponibilidad de las plazas vehiculares. El sistema permitirá a los usuarios reducir el tiempo de búsqueda de un espacio de aparcamiento disponible. Para ello, un monitor en la entrada del estacionamiento indicará la cantidad de espacios disponibles gracias a una interfaz web amigable-accesible para los usuarios del mencionado campus.

Este estudio comprende cuatro capítulos: los dos primeros están dedicados a la investigación preliminar relacionada al caso, mientras que los dos últimos describen la metodología del diseño y el diseño mismo de la red. El primer capítulo describe los problemas actuales en el servicio de estacionamientos a nivel internacional, local y organizacional, buscando la comprensión del tema y vías de solución. El segundo capítulo presenta las redes inalámbricas de sensores como tecnología, su funcionamiento y aplicaciones, una de las cuales es el desarrollo de tecnología urbana. El tercer capítulo trata la metodología del diseño de la red inalámbrica de sensores, abarcando los objetivos de la tesis, los requerimientos principales y la investigación de proveedores de dispositivos y *software* que se utilizarán en el sistema. Finalmente, el cuarto capítulo aborda la arquitectura de la red, el proceso que seguirá y los dispositivos escogidos para conformar el diseño de esta; asimismo, se presenta las pruebas realizadas y las conclusiones.

La simulación del funcionamiento del sistema permite concluir en la correcta operación de los dispositivos de comunicación y los elementos de monitoreo de espacios.

CAPÍTULO 1

PROBLEMÁTICA EN LOS ESTACIONAMIENTOS VEHICULARES

En el escenario de la dinámica urbanística de una ciudad el estacionamiento se ha convertido en un álgido tema de discusión ya que trae como consecuencia diversos problemas, tales como la pérdida de tiempo. Los vehículos están estacionados en un promedio de 23 horas al día, y para cada recorrido que hace un auto, se necesita espacios de aparcamiento tanto para el lugar de partida como para el destino; así, son varios los espacios que son requeridos para cada automóvil. [1]

La disponibilidad de estos espacios es un factor determinante para que las personas elijan si manejan o no hacia algún destino. Este hecho puede influir, finalmente, en la toma de decisión para adquirir un vehículo; como también este déficit de espacios puede ser motivo para no desplazarse o no llevar a cabo un viaje. El marco problemático se centra en el servicio de aparcamiento – la demanda de estacionamientos contra la oferta ofrecida – en tres diferentes contextos: internacional, local y organizacional. [1]

1.1. Contexto internacional

En el ámbito mundial, el incremento sostenido del parque automotor genera una congestión vehicular sistemática y preocupante. En la Unión Europea al parecer se concentra la mayor parte de la población en las áreas urbanas, generando ello variados problemas relacionados con el tráfico. Del mismo modo, varias ciudades de los Estados Unidos han llegado a tener verdadero caos vehicular y tráfico desmedido. Aun considerando las mejoras en el transporte público, estas continúan liderando la lista de las ciudades con mayor tráfico del mundo. Por citar un ejemplo, el 2017 en la ciudad de Los Ángeles se obtuvo una cantidad de 120 horas adicionales al año de tráfico. Esta congestión vehicular le cuesta al país billones de dólares, por no decir que además amenaza el futuro crecimiento económico y reduce la calidad de vida. Por otra parte, en Londres, colectivos importantes de ciudadanos han decidido no tener un automóvil propio como consecuencia de la marcada congestión vehicular. [1] [2] [3]

No cabe duda que el déficit de espacios de parqueo es una consecuencia del elevado crecimiento del parque automotor de una ciudad cuando su infraestructura no se adecúa a la densidad vehicular. La construcción de más espacios de estacionamiento

podría ser una solución, aunque esta demanda presupuestos, tiempo y espacio, por consiguiente, sería una respuesta de largo plazo. Una forma de afrontar el tema ha sido la instalación de sistemas de aparcamientos, estos controlan la hora de entrada y salida del vehículo del aparcamiento. Estos hacen posible controlar el tiempo de uso y la cantidad de usuarios que usan los estacionamientos. [4]

Ello ha generado que el parqueo tradicional tienda a ser reemplazado por sistemas tecnológicos de parqueo desarrollados alrededor del mundo y que ayudan a solucionar la falta de aparcamientos. Sin embargo, varias ciudades en desarrollo aún se encuentran en una fase inicial de tecnología urbana.

1.2. Contexto local

Según el Plan Estratégico Nacional 2017-2021, hasta el 2015 el parque automotor superó los cinco millones de vehículos, la mayoría concentrados en la ciudad de Lima Metropolitana. Por consiguiente, la congestión y la falta de espacios para estacionar se han convertido en un problema que tiende a agudizarse. En muchos casos el diseño de los estacionamientos no es el adecuado, generándose desorden y grandes colas, no solo para ingresar sino también para encontrar parqueo disponible. [4] [5]

La ciudad de Lima Metropolitana viene siendo perjudicada durante varios años por el caos vehicular que comprende el crecimiento sostenido del parque automotor y la pobre gestión municipal del transporte. Al respecto, el Gerente Comercial de Desarrolladora del Pacífico, Gonzalo Arredondo Bellido, sostiene que se debería contar con un estacionamiento por cada 40 o 50 m² de oficina. Añade que el déficit de aparcamientos va en aumento en paralelo con el crecimiento del número de limeños que viajan en vehículos propios. [6] [7] [8]

Así, el déficit de espacios de parqueo es claro. Se sostiene que existe un déficit de 45 mil espacios de parqueo en Lima; distritos como San Isidro, Miraflores, Surco, San Borja y San Miguel son los que presentan las mayores tasas de escases de estos espacios. Al hacer un razonamiento global podemos decir que la ciudad no tiene suficiente capacidad vial para soportar la cantidad de vehículos que la transitan. Solo algunos establecimientos públicos cuentan con tecnología novedosa de control automovilístico en estacionamientos. [9] [10]

En lo que se conoce como hora punta, la mayoría de los espacios de aparcamiento están ocupados. Cuando llega un nuevo usuario, le toma más tiempo encontrar una

plaza disponible. La Tabla 1.1 da cuenta de los principales problemas generados por la falta de espacios de parqueo en horas concurridas.

Tabla 1.1. Problemas debido al déficit de estacionamientos. [Elaboración propia]

	Para el conductor	Para el medio ambiente	Para el país
Problemas	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de tiempo. • Insatisfacción y estrés. • Consumo adicional de combustible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor emisión de gases contaminantes al medio ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de crecimiento económico y calidad de vida.

Hay que destacar que las consecuencias de la emisión de gases contaminantes son devastadoras. Según la Fundación Transitemos un ciudadano promedio pierde hasta siete días al año atrapado en el tráfico y alrededor de 3 mil mueren anualmente por la contaminación que produce el parque automotor. [7]

El actual alcalde de San Isidro, Manuel Velarde propone la implementación de parquímetros como alternativa para mejorar los estacionamientos de la ciudad, la cual puede ser una solución viable si se aplica en estacionamientos públicos. [11]

1.3. Contexto organizacional

La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) geográficamente está ubicada en el distrito de San Miguel en la ciudad de Lima, Perú (ver Figura 1.1). Está caracterizada por ser una universidad de excelencia, reconocida como el mayor centro multidisciplinario de innovación científica, humanística y cultural del Perú. Si bien la universidad no presenta problemas importantes de ausencia de estacionamientos, si es conveniente examinar el contexto organizacional. [12]

El proveedor de servicios de estacionamiento es la empresa Los Portales S.A. Hay que señalar que no existe una tecnología que ayude a los conductores a ubicarse en un área de parqueo adecuado; esto ha generado un problema en ciertas temporadas del año académico donde hay una mayor concentración de vehículos en el campus. Estimamos que la instalación de un sistema de monitoreo de espacios de parqueo disponibles en la PUCP reduciría la insatisfacción de un gran colectivo de conductores que hacen uso de la playa de aparcamiento de esta casa de estudios. [10]

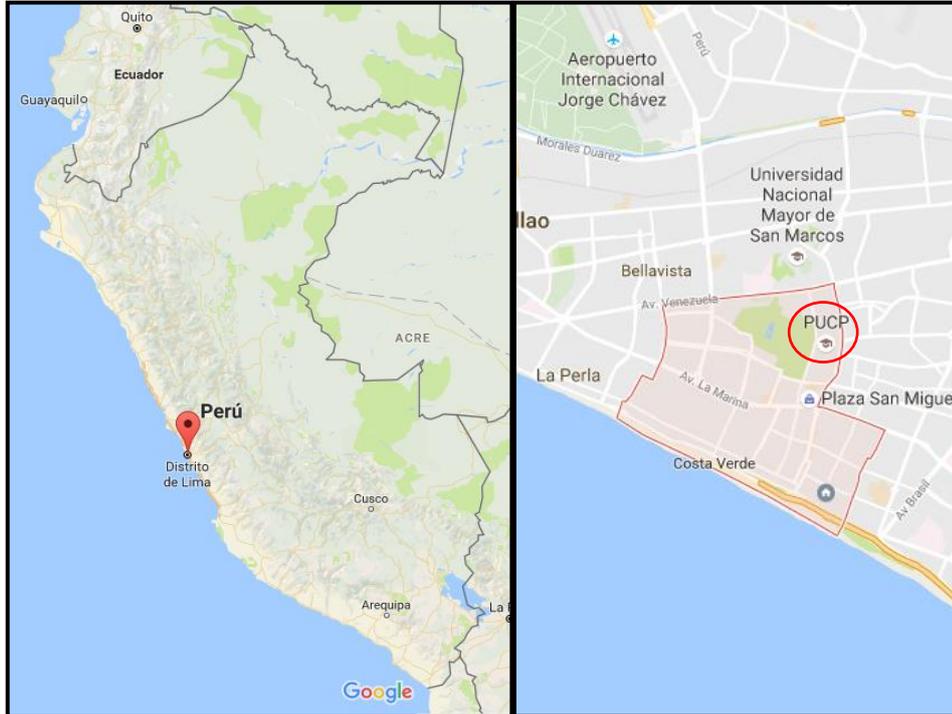


Figura 1.1. Mapa de la ubicación del campus principal de la PUCP. [13]

Al respecto, los trabajadores de Los Portales S.A. responsables de la administración de la PUCP, tienen la tarea del conteo de vehículos que acceden y abandonan el estacionamiento, independientemente de vigilar los automóviles y revisar su estado durante el periodo de su permanencia y para asegurarse ausencia de daños físicos. [14]



Figura 1.2. Ubicación del estacionamiento K en el campus principal de la PUCP. [13]

El estacionamiento K está ubicado en la zona posterior de la universidad (ver Figura 1.2), y tiene capacidad para más de 200 vehículos. Es uno de los dos aparcamientos más cercanos a la entrada de la universidad por la Av. Riva Agüero (ver. Figura 1.3).

Esta es una de las razones por las que muchas personas eligen este acceso para ingresar al recinto universitario preferentemente. En la presente tesis este aparcamiento se tomará como base para el planteamiento y diseño de la red inalámbrica de sensores. En la Figura 1.4 podemos apreciar las dimensiones del parqueo, el cual cuenta con aproximadamente 272 m de largo y 35 m de ancho.



Figura 1.3. Estacionamiento K de la PUCP. [15]

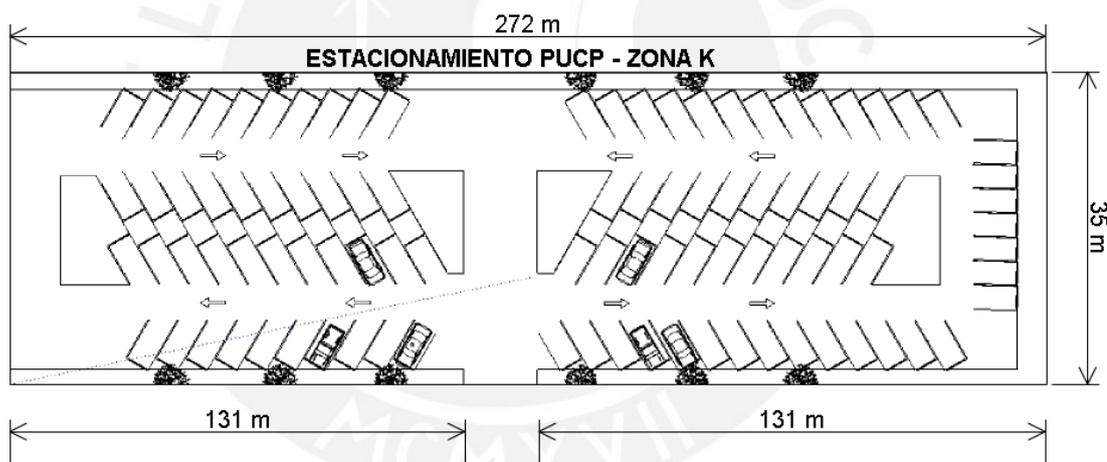


Figura 1.4. Dimensiones del estacionamiento K. [Elaboración propia]

1.4. Declaración del marco problemático

La disponibilidad de un adecuado servicio de parqueo es uno de los beneficios que debería ofertar la ciudad. Debido al crecimiento urbano desordenado, la demanda de estacionamientos y la escasez de los mismos se han convertido en un problema que aqueja a todos los conductores de la ciudad.

A nivel global, el crecimiento vehicular de los países con más vehículos per cápita como Estados Unidos, Canadá o Australia, se han visto en la necesidad de diseñar e implementar tecnologías que ordenen el tráfico. La ciudad de Lima se encuentra en una etapa de crecimiento tecnológico; así, solo existen pocos establecimientos

con una tecnología de redes de sensores para el control vehicular en los parqueos. Predomina, por tanto, un servicio carente de una tecnología que beneficie a los clientes que buscan estacionar, independientemente que no exista un mapa de los espacios de estacionamiento disponibles al público.

En la Pontificia Universidad Católica del Perú, no existe un sistema de monitoreo de parqueo que beneficie a los conductores, esto ha originado problemas que tiene como consecuencias la pérdida de tiempo del conductor, además de contribuir con la contaminación. En la Tabla 1.2 se presentan una serie de hechos y problemas presentes en la universidad.

Tabla 1.2. Hechos y problemas en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

[Elaboración propia]

Hechos	Problemas
a) Infraestructura	Es adecuada pero podría mejorar. Hay épocas del año en donde los espacios de estacionamiento no son suficientes, como en exámenes parciales o finales, o incluso en eventos de la universidad.
b) Personal	Actualmente, los trabajadores de Los Portales S.A. implicados en la administración de la PUCP tienen tareas básicas.
c) Tecnología	El sistema no otorga ningún tipo de información a los conductores de los vehículos que ingresan a la universidad, por lo que este sistema de monitoreo básico y sin tecnología, totalmente ligado al posible error humano. Además, solo se usa para un registro privado que comparten los tecnólogos encargados, mas no para brindar ayuda a los conductores que no encuentran espacios disponibles.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

2.1. Síntesis del asunto de estudio

Es indiscutible que en la ciudad de Lima existe un problema originado por el descontrol vehicular en las calles, así como la carencia de sistemas de aparcamiento. La gran demanda de este servicio y el déficit de oferta han ocasionado que los espacios de parqueo públicos suelen estar ocupados, por lo que un conductor se toma un tiempo importante en la búsqueda de un espacio para estacionar.

Como una alternativa de solución a este desorden se han desarrollado en varios países sistemas de monitoreo donde la idea general es proporcionar al usuario una guía para los vehículos que ingresan al recinto, de tal forma que encuentren espacios disponibles de una manera más ágil. Varios de estos sistemas están basados en redes inalámbricas de sensores, redes de datos que transportan y almacenan información obtenida de un campo monitoreado por sensores.

Como su nombre lo indica, esta red es de tipo inalámbrico, debido a que usualmente es pesado y costoso colocar cables en las zonas en las que se instala –por citar el caso de un estacionamiento no cubierto— además de que un diseño alámbrico no permite la misma escalabilidad que uno inalámbrico.

En la Pontificia Universidad Católica del Perú hace falta un sistema tecnológico de ayuda al conductor al momento de ingresar a la universidad con su vehículo. En la investigación se analizará el estado del estacionamiento K del campus universitario, el mismo que es un estacionamiento privado no cubierto. En ese sentido se presentan las redes inalámbricas de sensores como alternativa para el monitoreo de los espacios automovilísticos de la universidad.

2.2. Antecedentes

La tecnología de redes inalámbricas de sensores tiene varios años de aplicación. Varios estudios basados en estos sistemas han surgido a nivel global, de la misma manera se puede decir de la tecnología aplicada al servicio de parqueo, tal como se mencionó anteriormente.

En la literatura encontramos el reporte de un grupo de estudiantes de la UCC (University College Cork), de Irlanda, que llevó a cabo una investigación focalizada

en la administración de espacios de parqueo vehicular utilizando redes inalámbricas de sensores. El estudio se resume en el uso de sensores magnéticos ubicados en cada plaza de estacionamiento como medida de monitoreo de los espacios. El monitoreo tiene acceso a una base de datos utilizando la mencionada red inalámbrica de sensores, con dispositivos DSYS25z, desarrollados por la misma universidad. [16]

En la revisión bibliográfica también encontramos antecedentes desarrollados por la empresa Nedap Mobility Solutions quienes han implementado en la ciudad de Les Mureaux, Francia, su propia tecnología de redes inalámbricas de sensores gracias a los denominados Sensit IR (ver Figura 2.1), con detección dual (utiliza dos tipos de sensores: infrarrojo y magnético). Además de una base de datos que administra los espacios vehiculares, se cuenta con monitores en zonas de la ciudad los cuales muestran la cantidad de espacios disponibles en cada calle donde es posible estacionar. [17]



Figura 2.1. Sensor dual Sensit IR. [17]

En nuestro país algunos locales ya cuentan con esta tecnología avanzada de control de aparcamientos. El centro comercial Jockey Plaza, por ejemplo, tiene un contrato con la empresa Circontrol, el servicio beneficia significativamente a los usuarios con un control de la disponibilidad de espacios de estacionamientos. Para los efectos, cuenta con una sala de control centralizada y monitores en cada una de las zonas del estacionamiento del mencionado centro comercial. Los monitores informativos se muestran en la Figura 2.2. A diferencia de los sistemas mencionados, este está basado en fibra óptica, y no en redes inalámbricas de sensores. Se trata de una tecnología de comunicación mucho más costosa, pero más eficiente para redes grandes. [18]

Otros proyectos locales nos sirven como referentes para el presente estudio. Así, la empresa XD-TECH ha desarrollado un sistema de domótica basado en redes inalámbricas de sensores, utilizando la tecnología ZigBee, asimismo, la empresa Chain Services TI ha creado un sistema de monitoreo de estacionamientos de la

misma naturaleza, utilizando la tecnología WiFi. Ahora bien, en la PUCP se llevó a cabo un proyecto de monitoreo de espacios disponibles de estacionamiento basado en redes inalámbricas, con la participación de un equipo de ingenieros y docentes. [19] [20] [21]



Figura 2.2. *Display* informativo de la disponibilidad de espacios de estacionamiento en tiempo real. [18]

2.3. Fundamentos teóricos

2.3.1. Redes inalámbricas de sensores

Una red inalámbrica de sensores es una red de datos focalizada en la interacción de un gran número de sensores distribuidos en un área local, en donde se encuentra el fenómeno a analizar. Las redes inalámbricas de sensores tienen la particularidad de ser poco costosas, de bajo consumo de energía y con dispositivos de menor tamaño para un sistema inalámbrico. Limitaciones en energía y ancho de banda son algunos de los retos que se deben afrontar en el diseño de una red inalámbrica de sensores eficiente y confiable. [22] [23]

Elementos de una red inalámbrica de sensores

- *Coordinador:*

Es el dispositivo primordial de una red inalámbrica de sensores, y se encarga de formar y controlar la red, además de manejar datos, entregar direcciones, permitir y denegar nuevos ingresos a la red, entre otras funciones importantes. Solo puede existir un único coordinador en una red inalámbrica de sensores. [24]

- *Router.*

Los enrutadores o *routers* tienen todas las funciones de un dispositivo de red de sensores. Estos gestionan las rutas de los paquetes enviados y recibidos. Comúnmente son usados como enlaces entre dispositivos de red que están muy

alejados entre sí. Además, normalmente forman parte de la columna vertebral de una red; por ello, necesitan estar conectados a la red eléctrica. Como dato adicional, los *routers* y el coordinador son considerados dispositivos de funcionalidad completa (FFD). [24]

- Dispositivo terminal:

Los dispositivos terminales son, esencialmente, una versión de los *routers* con menos funcionalidades. Estos son considerados dispositivos de funcionalidad reducida (RFD); sus funciones principales son enviar y recibir datos, y unirse a una red. Debido a esto, utilizan un *hardware* más sencillo que los demás dispositivos y pueden funcionar intermitentemente para ahorrar energía, por lo que no necesitan estar conectados a la red eléctrica sino que pueden estar alimentados por una batería. Si el dispositivo además hace uso de un sensor de cualquier propiedad, se le denomina nodo sensor. Este nodo analiza las condiciones ambientales que lo rodean y envía esta información al coordinador de la red. [24]

Elementos adicionales

- Estación base:

También llamado central de monitoreo, es un dispositivo o conjunto de dispositivos central que recibe la información de todos los detectores de espacios disponibles del sistema. La estación base es el pilar más alto en una red distribuida, el cual realiza las funciones de inicializador y coordinador. [24]

- Área de trabajo:

Se trata de la región de monitoreo y análisis, donde están distribuidos los elementos de la red inalámbrica de sensores, desde los dispositivos terminales hasta el coordinador y la estación base. [24]

Topologías de Red

Existen diferentes topologías para las redes inalámbricas de sensores. A continuación se describen ellas y se muestra en la Figura 2.4:

- **Topología Estrella.** Cada nodo se conecta directamente a un coordinador. Este puede enviar y recibir data de los nodos; no obstante, estos últimos no se pueden comunicar entre sí.
- **Topología Árbol.** En esta el coordinador está conectado directamente a varios nodos, y cada uno de estos también tienen nodos a su disposición –es decir,

ordenados en otra topología estrella— formando una estructura similar a las ramas de un árbol.

- **Topología Malla.** Permite la comunicación entre cualquier par de nodos dentro de un mismo radio de transmisión y no sigue una estructura definida como las demás topologías.

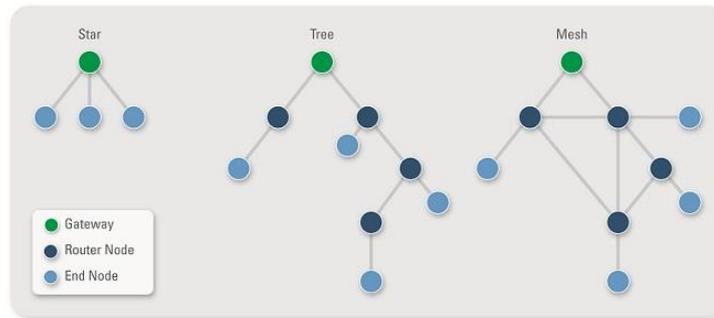


Figura 2.3. Topologías de red: Estrella, árbol y malla (de izquierda a derecha). [25]

Estándar IEEE 802.15.4

Cuando se trata de redes inalámbricas de sensores, se precisa un bajo consumo de energía dado que sus aplicaciones no permiten un práctico reemplazo de baterías en los nodos. Dicho esto, estándares como el IEEE 802.11 (WiFi) no podrían usarse debido a la alta potencia que requieren. Bluetooth es otro estándar con una gran complejidad que se ha ido consolidando a lo largo de los años. Es por ello que se creó un grupo dedicado al estándar IEEE 802.15.4 para redes inalámbricas de área personal y de baja tasa de transferencia (LR-WPAN por sus siglas en inglés). [26]

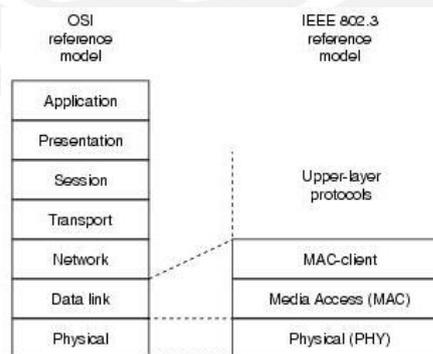


Figura 2.4. Modelos referencias de la pila OSI y la pila del IEEE 802. [27]

La Figura 2.4 muestra el modelo de protocolos de comunicación en redes inalámbricas de sensores, en comparación con el modelo OSI. En la figura mencionada, se puede apreciar que la capa de enlace se divide en dos subcapas: control de acceso al medio (MAC por sus siglas en inglés) y control de enlace lógico

(LLC por sus siglas en inglés). El estándar IEEE 802.15.4 se enfoca en definir las especificaciones de la capa física y la subcapa MAC.

Este estándar opera en las bandas ISM, bandas ocupadas por dispositivos que no requieren de una licencia de uso. Ya que varios dispositivos de otros estándares como WiFi y Bluetooth ocupan estas bandas ISM, queda claro que es importante lograr la coexistencia de todas estas redes.

En la Figura 2.5 se puede apreciar cómo están caracterizadas las capas del estándar. La capa física define 27 canales: 16 canales para una velocidad de 250 kbps en la banda ISM de 2.4 – 2.4835 GHz globalmente accesible, 10 canales para una velocidad de 40 kbps en la banda ISM de 902 – 928 MHz accesible para Norte América y 1 canal para una velocidad de 20 kbps en la banda ISM de 868 – 868.6 MHz accesible para Europa (ver Tabla 2.1). [28]

Tabla 2.1. Conjunto de frecuencias que pertenecen a las bandas ISM. [28]

Banda ISM	Velocidad	N° de canales	Accesibilidad
2.4 – 2.4835 GHz	250 kbps	16	Global
902 – 928 MHz	40 kbps	10	Norte América
868 – 868.8 MHz	20 kbps	1	Europa

El estándar IEEE 802.15.4 también define las especificaciones de la capa de enlace; sin embargo, especifica y únicamente de la subcapa MAC, ya que la subcapa LLC está definida por el estándar 802.2, así como en otros estándares del IEEE como el 802.3 (Ethernet), 802.11 (WiFi) y el 802.15.1 (Bluetooth). [26]

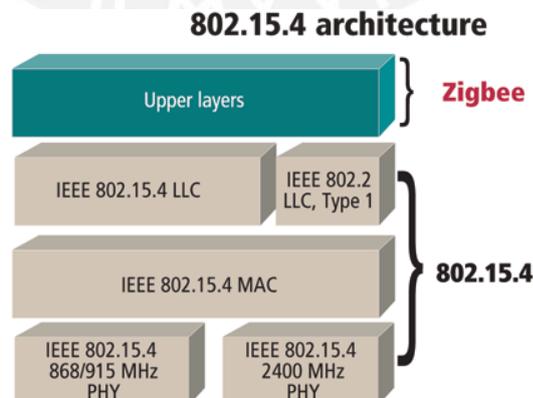


Figura 2.5. Especificaciones detalladas de la capa física y la capa de enlace del estándar IEEE 802.15.4. [29]

La subcapa MAC focaliza su acción en el control de acceso al medio, es decir, en administrar los tiempos en que ciertos equipos que comparten un mismo medio pueden enviar archivos. El estándar 802.15.4 hace uso del mecanismo de acceso múltiple con detección de portadora y evasión de colisión (CSMA/CA por sus siglas en inglés), un mecanismo de control de acceso al medio dominante en redes inalámbricas, en especial WiFi. [26]

Por otra parte, el grupo también se encarga de estandarizar las otras capas de la pila, pero no con la misma intensidad que la capa física y la subcapa MAC. Para los efectos han surgido otros protocolos, como el protocolo de comunicación ZigBee.

Protocolo ZigBee

El protocolo ZigBee puede alcanzar una tasa de transferencia de 250 kbps lo cual es significativamente menor que otros estándares como Bluetooth, WiFi o 3G (ver Figura 2.6). Sin embargo, para una red de sensores inalámbrica, altas tasas de transferencia no son necesarias ya que se envían datos de relativamente poco tamaño. Además, las redes ZigBee tienen la capacidad de auto regenerarse, soportan varias topologías y pueden distribuir más de 65 000 direcciones, características que le proporciona una alta confiabilidad y escalabilidad. [30]

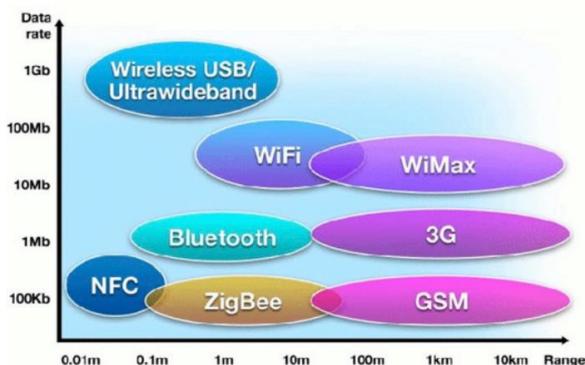
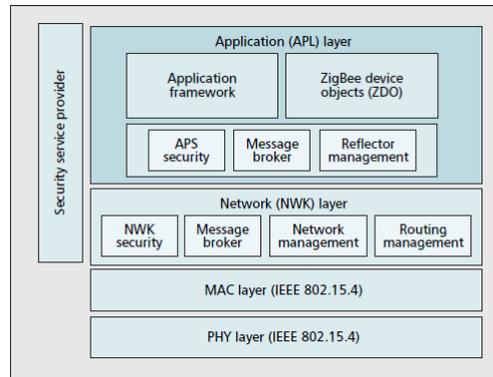


Figura 2.6. Gráfico de Tasa de transferencia vs. Rango, en el que se incluyen varias tecnologías inalámbricas. [31]

ZigBee es una tecnología que se encarga de establecer redes inalámbricas de sensores a mayor escala. Mientras que el estándar IEEE 802.15.4 solo se enfoca en las capas física y de enlace de la pila de redes inalámbricas de sensores, y presenta las topologías de red más simples posible, el protocolo ZigBee complementa esta estructura definiendo las capas superiores. En este caso, ZigBee ofrece una capa de red, la cual define especificaciones de topologías y direccionamiento de red, una capa

de aplicación, la cual es la interfaz entre el dispositivo con protocolo ZigBee y el usuario que lo configura, y una capa de seguridad (ver Figura 2.7). [32]



■ Figure 1. ZigBee stack diagram.

Figura 2.7. Especificaciones detalladas de la capa de red y la capa de aplicación del protocolo ZigBee. [29]

El protocolo de comunicación ZigBee está enfocado a redes LR-WPAN, y por su parte presenta diferentes especificaciones que los demás estándares del IEEE. En la Tabla 2.2 se presenta una comparación de los estándares WiFi, Bluetooth, UWB y ZigBee. Se puede apreciar que el protocolo ZigBee tiene ciertas ventajas como una menor potencia de transmisión y un mayor número de nodos por red, a costa de una menor tasa de transferencia.

Otras tecnologías enfocadas en redes LR-WPAN son las conocidas Bluetooth LE (BLE) y Z-Wave. En costos, son comparables con la tecnología ZigBee; sin embargo, ZigBee tiene varias ventajas en relación con las dos, dado que tiene una mayor cobertura que BLE y es mucho más versátil que Z-Wave. [33] [34]

Tabla 2.2. Comparación entre los protocolos WiFi, Bluetooth, UWB y ZigBee. [35]

Estándar	WiFi	Bluetooth	UWB	ZigBee
IEEE	802.11 a/b/g/n	802.15.1	802.15.3	802.15.4
Banda de frecuencias de operación	2.4 GHz; 5 GHz	2.4 GHz	3.1 – 10.6 GHz	868/915 MHz; 2.4 GHz
Número de canales	14 (2.4 GHz)	79	1 – 15	1/10; 16
Ancho de banda del canal	22 MHz	1 MHz	500 MHz – 7.5 GHz	0.3/0.6 MHz; 2 MHz
Tasa de bits máxima	54 Mbps	1 Mbps	110 Mbps	250 Kbps
Cobertura nominal	100 m	10 m	10 m	10 – 100 m
Potencia de transmisión nominal	15 – 20 dBm	0 – 10 dBm	-41.3 dBm/MHz	-25 – 0 dBm
Modulación	BPSK, QPSK, COFDM, CCK, OFDM	GFSK	BPSK, QPSK	BPSK, O-QPSK
Técnica de espectro disperso	DSSS, CCK, OFDM	FHSS	DS-UWB, MB-OFDM	DSSS
Número máximo de nodos	32	7	128	65536

2.3.2. Monitoreo de espacios de estacionamiento

Como se señaló anteriormente, los aparcamientos son un servicio urbano ofrecido a los usuarios en un local o en una ciudad. Según su ubicación, los tipos de aparcamientos son los siguientes: [1]

- Estacionamiento en vía: Es un tipo de parqueo público situado, como su nombre lo indica, en la vía pública, y con acceso para cualquier usuario con un vehículo.
- Estacionamiento público fuera de vía: Son parqueaderos fuera de la vía pública. En esta clase, los usuarios pueden estacionar su vehículo con una permanencia máxima impuesta y pagando una tarifa.
- Estacionamiento privado no residencial (PNR) fuera de vía: Se encuentra dentro de un edificio en particular, como puede ser una empresa, centro comercial o centro estudiantil.

- Estacionamiento privado residencial fuera de vía: Son aquellos estacionamientos ubicados en las viviendas residenciales o edificios con departamentos.

Según su diseño, pueden ser de los siguientes tipos: [36]

- Estacionamiento cubierto abierto: Son estacionamientos al aire libre, techados para la protección de los vehículos contra las lluvias, nieve y granizo.
- Estacionamiento cubierto cerrado: Son los parqueos dentro de edificios, ya que todos están bajo techo, sea este subterráneo o sobre el nivel del suelo.
- Estacionamiento no cubierto: Son espacios al aire libre sin ningún techo que proteja a los automóviles.

En el caso del estacionamiento K de la PUCP, este es un espacio no cubierto ya que no dispone de un techo, y su clasificación sería privada no residencial.

Se conoce que la falta de espacios de estacionamiento es un sentido problema masivo, el cual puede influir en las personas a no viajar en automóvil propio. Este marcado déficit de espacios de parqueo hace pensar en la urgente necesidad de promocionar un sistema de administración de parqueos. Este tipo de sistema se encarga de analizar los espacios de aparcamiento, registrando el ingreso y salida de cada vehículo y los lugares disponibles en determinados momentos. [1]

Los elementos de los sistemas de monitoreo de espacios disponibles de estacionamiento pueden ser los siguientes: [16]

Dispositivos de monitoreo

Los sensores son dispositivos que se encuentran en contacto directo con los espacios de aparcamiento y determinan la disponibilidad de estos. Puede haber uno por espacio, como puede existir uno que monitoree varios espacios. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Sensores de proximidad:

Estos dispositivos miden la distancia a la que se encuentra un obstáculo, el cual en este caso es un vehículo. Existen varios tipos de sensores dentro de esta clase como los sensores ultrasónicos, los sensores infrarrojos o los sensores piezoeléctricos. Son de común uso en estacionamientos cubiertos, puesto que pueden estar ubicados en el techo para medir la variación de distancia cuando ingresa un automóvil. En estacionamientos no cubiertos no son tan comunes, y se instalan en el asfalto mismo;

registran la distancia al suelo de los vehículos, la cual es una constante dada por cada empresa en la industria automotriz.

- Sensores de campo magnético:

Estos dispositivos miden la variación en la intensidad del campo magnético cuando un vehículo ingresa o sale de una plaza. Su uso es más común en estacionamientos no cubiertos, debido a que son más eficientes que los sensores de proximidad.

- Sensores de intensidad luminosa:

Su uso común sería instalarlos en el suelo de la plaza. Estos sensores pueden monitorear la luz alrededor de ellos, de manera que si esta disminuye rápidamente, indicarían el estacionamiento de un vehículo.

- Cámaras:

Son dispositivos que utilizan la técnica de procesamiento de imágenes para determinar la disponibilidad de los espacios en un estacionamiento. Normalmente, son mucho más costosas que los sensores pero se pueden utilizar una o dos cámaras para un conjunto numeroso de estacionamientos.

Tecnología de red

Todo sistema de monitoreo de espacios de parqueo debe tener el soporte de una tecnología de red que interconecte todos los dispositivos del conjunto. Estos se pueden dividir en dos grandes grupos: [37]

- LAN (Local Area Network):

Una LAN es un sistema de interconexión de equipos informáticos basado en líneas de alta velocidad. En general, ofrecen un mínimo porcentaje de error, garantizan seguridad en el intercambio de datos y pueden alcanzar tasas de transmisión muy altas. Sin embargo, el uso de cables resulta en un costo adicional de instalación, además de que provee una escalabilidad baja y una estética poco apreciable.

- WLAN (Wireless Local Area Network):

Una WLAN es un sistema de comunicación de datos que manipula tecnologías de radiofrecuencia. Los dispositivos en las redes inalámbricas no necesitan estar conectados físicamente a cables, sino que utilizan antenas para convertir las señales eléctricas del dispositivo en señales electromagnéticas, dispersadas en el aire y

enviadas a todos los dispositivos vecinos de la red. La instalación de una red inalámbrica es sencilla, y se necesita de inversión inicial menor ya que no se utilizarán cables de red. Por último, con una red inalámbrica se obtiene una escalabilidad y flexibilidad altas. El rendimiento y la seguridad en una WLAN siempre serán menores que en una LAN; no obstante, las últimas tecnologías inalámbricas se han esforzado en mejorar estos aspectos.

Central de Monitoreo

En una central de monitoreo, se realiza toda la administración y el monitoreo de la data adquirida por los dispositivos de entrada y enviada a las salidas correspondientes. La información se almacena en una base de datos para su lectura. Además, se lleva a cabo la detección y corrección de errores del sistema. Puede adquirirse, además, un servidor web. Es utilizado para que la data almacenada en la base de datos sea transportada a un sitio web, con el fin de que tenga acceso remoto por parte de los usuarios y de los administradores.

Monitores o Guías de estacionamiento

Los monitores indican la cantidad de estacionamientos disponibles en la zona donde este está ubicado, y también en las áreas próximas. Representa un beneficio directo para el conductor ya que le otorga información necesaria para reducir su recorrido en el estacionamiento.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

El método del estudio está orientado a la aplicación de un sistema tecnológico a un sector específico, este es: el servicio de estacionamientos. Por lo revisado, existen varias alternativas de soluciones para la optimización de este servicio, las cuales se fundamentan en redes inalámbricas de sensores. El procedimiento más práctico es la instalación de una gama de sensores distribuidos en cada uno de los espacios de parqueo que analicen la disponibilidad de los espacios de aparcamiento, y transfieran la información a una base de datos ubicada en una estación base. Luego, las posibilidades para ayudar al usuario son variadas, así, se puede implementar un *display* en el ingreso al estacionamiento que muestre los espacios disponibles en tiempo real, así como diseñar una página web que muestre estas plazas a los clientes.

El diseño de la red inalámbrica de sensores se llevará a cabo utilizando el protocolo ZigBee, ya que es el que más eficiencia de energía posee, y lo que se busca es que la red tenga un tiempo de vida de largo plazo. Además, se diseñará una base de datos y una página web amigable para el usuario, y se dispondrá de un *display* en la entrada del espacio de parqueo que sirva de guía informativa para el conductor. Las partes principales del sistema se pueden resumir en las siguientes: nodos sensores, central de monitoreo y *display* informativo.

3.1. Universo y muestra

UNIVERSO

En el presente estudio, el universo está conformado por todos los estacionamientos del campus principal de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

MUESTRA

Por su parte, la muestra está conformada por un par de plazas ubicadas en el estacionamiento vehicular K de la universidad, en donde se diseñará el sistema de monitoreo de espacios de estacionamiento.

3.2. Objetivos de la investigación

3.2.1. Objetivo general

Diseñar una red inalámbrica de sensores para el monitoreo de la disponibilidad de espacios en los estacionamientos de la PUCP, la cual beneficie al conductor influyendo en su decisión para ubicarse en un lugar específico.

3.2.2. Objetivos específicos

1. Determinar la forma en que la red inalámbrica de sensores ayudará en el monitoreo de espacios disponibles en el estacionamiento K de la PUCP y cómo se puede conseguir una confiabilidad y ahorro de energía máximos.
2. Identificar los sensores adecuados que determinen la presencia de un auto en cada espacio, independientemente del tamaño o forma de este, y que presenten una alta eficiencia de energía para su máxima duración.
3. Determinar en qué medida el coordinador de la red será capaz de recolectar los datos que los sensores obtengan y de qué manera los comunicará a la base de datos y al servidor web.
4. Estudiar la escalabilidad que posee el diseño de la red inalámbrica de sensores y en qué medida se podría avanzar para contener la red en todos los estacionamientos de la universidad.

3.3. Requerimientos

Los criterios principales a considerar para el sistema de monitoreo de espacios automovilísticos son los siguientes:

- Cobertura:

Es el rango en el que un dispositivo de una red inalámbrica puede ser detectado por otro con una probabilidad de error despreciable. Mientras mayor sea la cobertura, mayor es la probabilidad de que nodos sensores más lejanos puedan asociarse con el nodo coordinador.

- Consumo de energía:

Es importante considerar el nivel de consumo de energía en los nodos sensores, ya que estos dispositivos estarán alimentados con una batería. Las baterías son recursos limitados en el sistema, por lo que es una prioridad utilizar la menor energía posible sin comprometer la confiabilidad de la red. Para ello, los sensores solo deben actuar en una porción de tiempo de un periodo. Este ciclo activo corresponde al

porcentaje del periodo en el que la energía se consume: Mientras menor es el porcentaje, menor es el consumo de energía; sin embargo, es crucial que este corto tiempo sea suficiente para detectar, procesar y transmitir el estado del espacio de parqueo.

- Confiabilidad de la red:

Se debe generar un balance entre el ahorro de energía y la confiabilidad de la red. Es importante asegurarse que los mensajes o tramas se envían correctamente a través de las redes inalámbricas, en el menor tiempo posible, y con la mínima probabilidad de error.

- Tamaño:

Otra consideración relevante es el tamaño de los nodos sensores: Este debe ser el mínimo posible para que, en un espacio de estacionamiento, no estorbe al vehículo estacionado.

3.4. Comparación de proveedores

A continuación, se presentan varios elementos principales del sistema de monitoreo de espacios de estacionamiento, cuyos distintos proveedores fueron analizados y comparados para luego elegir el que mejor cumpla con los requerimientos. Se realizó una investigación más rigurosa en los elementos que forman parte de los nodos sensores.

3.4.1. Módulos ZigBee

Los módulos ZigBee tienen la ventaja de presentar una configuración predeterminada por la empresa que los provee, de tal forma que los parámetros que se configuran son los más esenciales y sencillos, hecho que facilita el trabajo del desarrollador. La desventaja, por otro lado, es que existe menos libertad al momento de programar los transceptores; sin embargo, hay que decir que para el diseño de esta tesis, no se necesita un modelo de red ZigBee complejo.

Dentro del estándar 802.15.4/ZigBee podemos encontrar una gran cantidad de proveedores de módulos inalámbricos. Algunos de los más destacados se encuentran en la Tabla 3.1, con las respectivas especificaciones de un ejemplar de sus productos. [38]

Tabla 3.1. Comparación entre módulos ZigBee de los proveedores Anaren, Atmel, CEL y Digi International. [38]

Fabricante	Anaren	Atmel	CEL	Digi
Módulo	AIR	ZigBit	MeshConnect	XBee
Clave de producto	A2530E24x	ATZB-S1-256-3-0-C	EM35x	XB24CZ7x
Dimensiones	11.0 x 19.0 mm	30.0 x 20.0 mm	16.63 x 23.87 mm	24.38 x 27.51 mm
Potencia de transmisión	+17 dBm	+3.6 dBm	+8 dBm	+8 dBm
Sensibilidad en la recepción	-95 dBm	-97 dBm	-100 dBm	-102 dBm
Voltaje de operación	2.2 – 3.6 VDC	1.8 – 3.6 VDC	2.1 – 3.6 VDC	2.1 – 3.6 VDC
Corriente de transmisión	68 mA	16.4 mA @ 3VDC	44 mA @ 3.3 VDC	33 mA @ 3.3 VDC
Corriente de recepción	28 mA	9.6 mA @ 3VDC	30 mA @ 3.3 VDC	28 mA @ 3.3 VDC
Corriente en modo reposo	0.4 μ A	0.6 μ A @ 3VDC	1 μ A @ 3.3 VDC	1 μ A @ 3.3 VDC
Costo	\$ 23.10	\$ 25.35	\$ 23.06	\$ 17.05

3.4.2. Sensores

Se pueden escoger entre una amplia gama de sensores, sin embargo, algunos no son de mucha utilidad para el presente trabajo. Los sensores infrarrojos, por ejemplo, tienen la desventaja de ser propensos al polvo y la humedad, ello puede originar que con el tiempo las lecturas fallen sistemáticamente. Lo mismo ocurre con los sensores de intensidad luminosa, en ellos el polvo acumulado evita que la luz pueda ser detectada por el sensor, lo que genera deficiencias en el monitoreo. Otros tipos de sensores tienen precios muy elevados, como los sensores piezoeléctricos y los sensores láser. Los dispositivos que pueden servir para la detección de vehículos dentro de la investigación en curso son los siguientes: sensores de ultrasonido y sensores magnéticos. [39]

Sensor ultrasónico

El sensor de ultrasonido o ultrasónico emplea las ondas de ultrasonido para calcular la distancia a un obstáculo. Un gráfico del funcionamiento del sensor se muestra en la Figura 3.1. Las ondas de ultrasonido tienen una frecuencia de alrededor de los 40 kHz y pueden ser utilizadas para mediciones de proximidad, ya que rebotan en cualquier objeto sólido. La velocidad teórica de las ondas de ultrasonido en el aire es de 340 m/s. La distancia de un sensor ultrasonido a un obstáculo es la que se presenta en la siguiente ecuación: [40]

$$Distancia (cm) = 0.034 \times \frac{Tiempo (\mu s)}{2}$$

En la Tabla 3.2 se muestran algunos sensores considerados.

Tabla 3.2. Comparación entre los módulos de sensores ultrasónicos. [41]

Fabricante	Micropik	Parallax	SparkFun	Geetech
Clave de producto	HC-SR04	28015	LV-MaxSonar-EZ	US-020
Dimensiones	20.0 x 45.0 x 15.0 mm	21.3 x 45.7 x 15.3 mm	22.1 x 19.9 x 15.5 mm	20.0 x 45.0 x 16.0 mm
Voltaje de operación	5 VDC	5 VDC	2.5 – 5.5 VDC	5 VDC
Corriente de operación	15 mA @ 5 VDC	30 mA @ 5 VDC	3 mA @ 5 VDC	3 mA @ 5 VDC
Frecuencia de lectura	40 Hz	40 Hz	40 Hz	40 Hz
Frecuencia ultrasonido	40 kHz	40 kHz	42 kHz	40 kHz
Distancia de medición	2 – 400 cm	2 – 300 cm	0 – 645 cm	2 – 700 cm
Resolución	3 mm	3 mm	2.54 cm (1 in)	3 mm
Costo	\$ 3.95	\$ 29.99	\$ 25.95	\$ 6.04

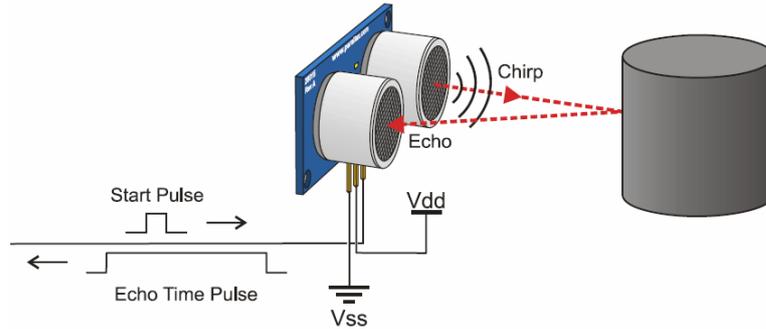


Figura 3.1. Funcionamiento de un sensor ultrasonido. [40]

Sensor magnético

Los sensores magnéticos miden la intensidad del campo magnético que los rodea. El campo magnético de la Tierra es generado por la corriente eléctrica que fluye en el hierro fundido del núcleo del planeta. En cierto punto específico del planeta, este campo puede ser alterado por un objeto compuesto por metales ferrosos, como lo es un automóvil. Este fenómeno se puede apreciar en la Figura 3.2, y puede ser detectado con un sensor magnético muy sensible. [42]

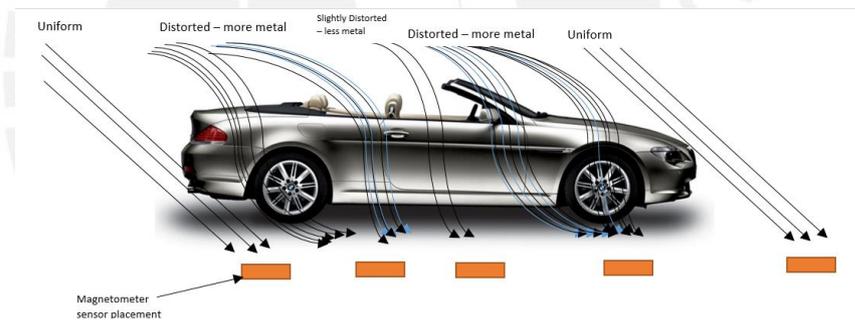


Figura 3.2. Campo magnético de la Tierra afectado por un vehículo mediano. [43]

No obstante, la lectura de la variación es un poco más compleja de lo que parece. El campo magnético de la Tierra no siempre es el mismo. La intensidad de campo magnético varía desde 22 μT hasta 67 μT ; asimismo, este valor depende del tiempo y de varios fenómenos como la radiación solar. [42]

En cierto modo, la intensidad total de campo magnético en un punto específico es equivalente a la suma vectorial de sus tres componentes cartesianas: componente norte-sur X , componente este-oeste Y e intensidad vertical Z , y por ende, su magnitud está dada por la siguiente ecuación: [42]

$$\text{Intensidad de Campo } (\mu\text{T}) = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

En la Tabla 3.3 se presentan algunos de estos sensores que se han considerado, fabricados como circuitos integrados.

Tabla 3.3. Comparación entre sensores magnéticos. [41]

Fabricante	NVE	Infineon	Honeywell	Freescale
Clave de producto	AA002	TLE5009	HMC5883L	MAG3110
Voltaje de operación	<1 – ±12 VDC	<1 – 6.5 VDC	2.16 – 3.6 VDC	1.95 – 3.6 VDC
Corriente de alimentación	6 mA	7 mA	100 µA (2 µA en Idle)	8.6 µA
Sensibilidad	11.0 mV/V-Oe	----	2.3 LSB/µT	10 LSB/µT
Resolución	----	0.6°	0.07 µT	0.10 µT
Rango de Operación Lineal	± 3 Gauss	0 – 360°	± 8 Gauss	± 10 Gauss
Rango de Temperatura	-50 – 150 °C	-40 – 150 °C	-30 – 85 °C	-40 – 85 °C
Costo	\$ 13.85	\$ 3.17	\$ 6.95	\$ 1.46

3.4.3. Microcontroladores

En cada nodo sensor, se necesita un dispositivo que procese la información obtenida por los sensores para obtener la disponibilidad del espacio de estacionamiento vehicular. Los microcontroladores son circuitos integrados programables que permiten llegar a este objetivo.

Además, como se había mencionado, los nodos sensores deben poseer algoritmos de ahorro de energía, de tal modo que se pueda prolongar el tiempo de vida de la batería del nodo. De este propósito también se encargará el microcontrolador. En la Tabla 3.4 se muestran los microcontroladores considerados para el presente estudio. Se pensó en los microcontroladores ATMEGA de la proveedora Atmel debido al previo conocimiento y uso de estos dispositivos en cursos de pregrado de la carrera de ingeniería electrónica.

Tabla 3.4. Comparación entre microcontroladores de ATMEL. [41]

Fabricante	Atmel		
Clave de producto	ATMEGA8	ATMEGA168	ATMEGA328
Número de Pines	28	28	28
Voltaje de operación	2.7 – 5.5 VDC	1.8 – 5.5 VDC	1.8 – 5.5 VDC
Corriente de operación (Activa)	3.6 mA	3.6 mA	3.6 mA
Corriente de operación (Power-down Mode)	0.5 uA	0.5 uA	0.5 uA
Máxima Frecuencia	16 MHz	20 MHz	20 MHz
Flash	8 KB	16 KB	32 KB
SRAM	1 KB	1 KB	2 KB
Comunicación I2C	Sí	Sí	Sí
Máximo Time-out del Watchdog Timer	2.2 s	8 s	8 s
Costo	\$ 2.61	\$ 3.11	\$ 3.37

3.4.4. Gestores de bases de datos

Los gestores de bases de datos son utilizados para la creación y administración de tablas de bases de datos en donde se almacenará la información del estado de cada plaza de estacionamiento. La Tabla 3.5 muestra una comparación simple de los gestores de bases de datos más usados.

Tabla 3.5. Comparación entre gestores de bases de datos. [44]

Software	MySQL	PostgreSQL	SQL Server
Desarrollador	Oracle	PostgreSQL Global Development Group	Microsoft
Licencia	Open Source	Open Source	Comercial
Soporte PHP	Sí	No	No
Compatibilidad SO	FreeBSD, Linux, OS X, Solaris, Windows	FreeBSD, Linux, OS X, Solaris, Windows, etc.	Windows

3.4.5. IDE para el desarrollo del servicio web

Es necesario un ambiente de desarrollo integrado (IDE) en donde se pueda crear un proyecto dinámico web, que tenga las funcionalidades necesarias para sostener una página web. En la Tabla 3.6 se muestra una comparación básica de dos de los programas más usados: IntelliJ IDEA y Eclipse.

Tabla 3.6. Comparación entre ambientes de desarrollo integrado web. [45]

Software	IntelliJ IDEA	Eclipse	Netbeans
Desarrollador	JetBrains	Eclipse	Sun/Oracle
Lenguajes	Java, C/C++, PHP, etc.	Java, C/C++, PHP, etc.	Java
Licencia	Trialware	Código Abierto	Permisiva Gratis
Compatibilidad SO	Multiplataforma	Multiplataforma	Multiplataforma
Smartcode	Sí	No	No
Costo	\$ 299 /año	Gratis	Gratis

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES PARA UN ESTACIONAMIENTO

4.1. Matemática

4.1.1. Canales de frecuencias en ZigBee

El protocolo ZigBee posee 16 canales de operación (Nº 11 – 26) para la banda de frecuencias de 2.4 GHz. Cuando se trabaja en cierto canal N , se opera en la frecuencia central f_c de este. [46]

$$f_c \text{ (MHz)} = 2405 + 2 \times (N - 11)$$

4.1.2. Atenuación de señales y estimación de rango

En el cálculo de la propagación de señales en una transmisión inalámbrica, se deben tomar en consideración los efectos en el camino de la señal que pueden ocasionar variaciones en esta. El primer parámetro, la pérdida en el trayecto $L_p(f, d)$ o path-loss, está dada por la disminución de la señal debido a la distancia entre los terminales, y a la frecuencia de la señal. El segundo efecto, el ensombrecimiento o *shadowing*, ocurre debido a los obstáculos en el camino; entonces, se debe considerar un margen de potencia conocido como Shadow Fading Margin o SFM. [47]

Otras variaciones que se deben considerar son la pérdida por cables L_c (si hubiera) y las ganancias de la antena transmisora G_{Tx} y de la antena receptora G_{Rx} . [47]

$$P_{Rx} = P_{Tx} - L_c + G_{Tx} - L_p(f, d) - \text{SFM} + G_{Rx}$$

La potencia de señal en el receptor P_{Rx} se da según la fórmula. Para una distancia d igual a la cobertura, P_{Rx} sería igual a la sensibilidad del receptor S_{Rx} . [47]

Para poder modelar más fácilmente el comportamiento, se expresa la siguiente fórmula para hallar la potencia recibida P_d a una distancia d del transmisor.

$$P_d = P_{Tx} - 10 \times n \times \log_{10}(f) - 10 \times n \times \log_{10}(d) + 30 \times n - 32.44$$

Para estimar la cobertura, se puede utilizar la siguiente fórmula empírica. En la fórmula se considera el exponente de path-loss n como un valor que depende de las condiciones del ambiente de aplicación, y que puede ser hallado de manera experimental; su valor varía de 2 a 5 aproximadamente. [46]

$$R (m) = 10^{\left(\frac{P_{Tx}-S_{FM}-S_{Rx}-10 \times n \times \log f + 30 \times n - 32.44}{10 \times n}\right)}$$

Cabe resaltar que el exponente de path-loss n es el factor más significativo en el cálculo, ya que puede variar el rango desde 10 hasta 1000 metros. Mientras más grande sea el exponente, la cobertura es peor. [46]

4.1.3. Capacidad de carga eléctrica

El ahorro de batería es importante ya que los nodos sensores deben durar el mayor tiempo posible. La capacidad de carga eléctrica de una batería define cuánta corriente puede proporcionar por un periodo determinado. Normalmente está dada en amperios-hora o miliamperios-hora.

$$\text{Capacidad (mAh)} = \text{Consumo de corriente (mA)} \times \text{Tiempo de descarga (h)}$$

Por ejemplo, para una duración de 1 año (asumiendo 24 h de uso), y una batería promedio de 9 V y 400 mAh, la corriente promedio de consumo debe ser 50 μ A, para asegurar que la descarga de la batería no sea en un tiempo menor al dado.

4.2. Análisis del sistema

4.2.1. Datos de entrada

El propósito del sistema es proveer un monitoreo del estado de las plazas de estacionamiento. Así, los datos de entrada son aquellos que permitan la lectura de la presencia de un vehículo en un espacio. Para ello, se consideran dos conceptos importantes como datos de entrada:

- Distancia al suelo: Debido a que se utilizará un sensor de ultrasonido, se considera la distancia medida por el sensor. Si esta distancia medida es menor a la mayor distancia al suelo posible de un vehículo, se considerará la presencia de un vehículo.
- Variación de campo magnético: El sensor magnético determinará la intensidad de campo magnético existente. Para los efectos se utilizará la variación de campo magnético en dos tiempos específicos para determinar la presencia de un vehículo.

4.2.2. Datos de salida

Los elementos informativos del sistema son la base de datos y el *display* o pantalla. Los datos de salida en la pantalla son simples: se muestra la cantidad de espacios disponibles en el estacionamiento. Por otra parte, en la base de datos se tiene una

lista de los estacionamientos; en cada uno de ellos se muestra el dispositivo XBee instalado, el tipo de estacionamiento y su estado actual.

La Tabla 4.1 da cuenta los estados de los espacios de parqueo en el presente sistema. Para los usuarios se definen dos estados posibles: Disponible y Ocupado. Además se definen tres tipos de estacionamiento:

- Común: Puede ser usado por cualquier usuario.
- Preferencial: De uso únicamente por usuarios con alguna discapacidad física.
- Reservado: Uso por la respectiva autoridad a la que le pertenezca.

Cuando un espacio se encuentre ocupado, este se mostrará de color rojo en la página web. Si el espacio está disponible, el color que se muestre depende del tipo de parqueo: verde para un espacio común, azul para un espacio preferencial y púrpura para un espacio reservado.

Tabla 4.1. Estados posibles en un espacio de estacionamiento. [Elaboración propia]

Clasificación	Estados			
Común	Disponible	Ocupado	Error de Lectura	Batería Baja
Preferencial	Disponible	Ocupado	Error de Lectura	Batería Baja
Reservado	Disponible	Ocupado	Error de Lectura	Batería Baja

Estos son los estados que se visibilizan para los usuarios. Los administradores, sin embargo, tendrán acceso a dos estados más: Error de lectura y Batería baja. El primero de estos se da cuando el sensor ultrasónico monitorea una distancia menor a 8 centímetros. En este caso, se asume que existe un obstáculo cerca al sensor que no permite la lectura correcta de la disponibilidad del espacio y debe ser revisado. El segundo de los estados se origina cuando la batería que alimenta a un nodo baja su tensión en más de un 20 %; la alerta se muestra para que esta pueda ser reemplazada a tiempo.

4.2.3. Análisis de los elementos de diseño

A continuación se pasa a definir las partes del sistema, sus componentes y cómo interactúan entre ellas. En efecto, las partes principales del sistema son las siguientes: los nodos sensores, la central de monitoreo y el *display*.

Análisis del nodo sensor

La Figura 4.1 ilustra la arquitectura de cada nodo sensor; se puede apreciar que se utilizarán dos sensores (como se había mencionado), un microcontrolador y un transceptor ZigBee, como dispositivos principales.

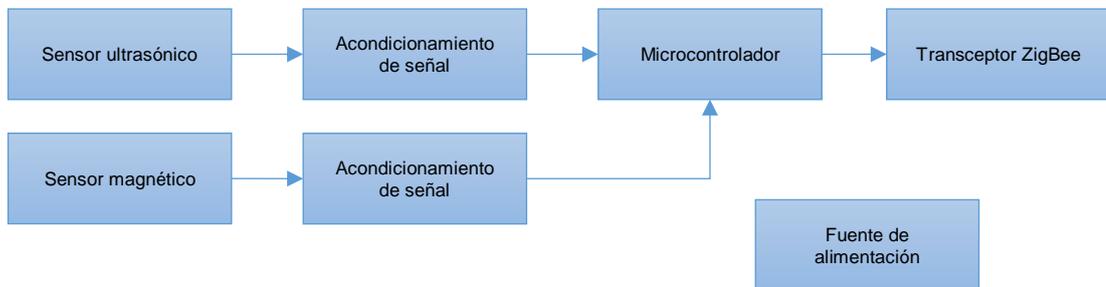


Figura 4.1. Arquitectura de un nodo sensor. [Elaboración propia]

La fuente de alimentación, por su parte, es una batería común de 9 V y 400 mAh. Se informó que se asumirá el ahorro de batería para el nodo sensor, ya que es un recurso limitado. Para un mejor manejo de la capacidad de carga eléctrica de la batería, se tendrán periodos inactivos en los dispositivos del nodo, de manera que el gasto de corriente en estos periodos sea mínimo; y la duración de los periodos activos solo sea el menor requerido.

Este proceso puede ser beneficioso de varias maneras. En primer lugar, es claro que el ahorro de batería está en los periodos inactivos, en donde se consume lo mínimo de corriente. En segundo lugar, en los periodos inactivos, existe una oportunidad para que la batería recupere una mínima capacidad de carga, que pudo ser perdida en durante la alta tasa de descarga en el periodo activo.

Dentro de los parámetros del sistema, es importante definir las corrientes máximas para periodos activos y para periodos inactivos. Una corriente promedio de 100 μA conduciría a tener una duración de 4000 horas (166 días) de la batería; este valor es una duración aceptable, por lo que se buscará que la corriente promedio sea menor a 100 μA . Para ello, se asumió el cálculo de este valor utilizando un periodo activo 500 veces menor al periodo inactivo y con corrientes de 25 mA (periodo activo) y de 50 μA (periodo inactivo).

A continuación, se presentará la selección de los componentes de esta sección del sistema.

- **Transceptor ZigBee**

Dentro de los proveedores mencionados en el capítulo anterior, Los módulos XBee se tomarán en consideración para la comunicación inalámbrica debido a la superioridad de Digi International frente a otras proveedoras en el mercado de módulos ZigBee y debido al bajo costo y alta compatibilidad con otros productos. En la Figura 4.2 se presenta las especificaciones de este transceptor, además de los requerimientos definidos en el presente estudio.

MÓDULO ZIGBEE



ESPECIFICACIONES	REQUERIMIENTOS	XBEE S2C
VCC	3.3 V; 5 V	2.16 – 3.6 V
ICC (Transmisión)	< 25 mA	33 mA (Variable)
ICC (Recepción)	< 25 mA	28 mA (Variable)
Compatibilidad	Alta	Alta
Sleep Mode	Sí	Sí
ICC (Reposo)	<< 50 μ A	< 1 μ A
Costo	---	\$ 17.05

Figura 4.2. Especificaciones del módulo XBee S2C. [Elaboración Propia]

Entre estos módulos se tienen varios productos. A continuación se presentan 4 ejemplos. Uno de estos productos es el XBee ZigBee (S2C), se trata de un modelo básico con métodos fáciles de integración y configuración de redes. Otro producto es el XBee PRO ZigBee, el cual tiene las mismas ventajas del primero producto, pero con propiedades adicionales y un mayor consumo de potencia. Por otra parte, el XBee DigiMesh es utilizado para redes amplias de topología malla, y utiliza el protocolo DigiMesh, creado por Digi. Por último, el dispositivo XBee WiFi está integrado con el protocolo de comunicación WiFi mediante el uso del almacenamiento en nube con Digi Device Cloud.

Otra forma de clasificar los productos es mediante las antenas de los módulos. Según las características de estas es que se puede conseguir diferente cobertura, tamaño, entre otras características. Al respecto, en la Figura 4.3 se puede apreciar cuatro de las antenas que ofrece Digi para sus módulos XBee.

- Antena Wire o Whip: Consiste en un cable flexible que es conectado directamente al transceptor. Claramente aumenta el tamaño del dispositivo total pero la compensación está en el aumento de cobertura.

- Antena PCB: Nace de la implementación de un circuito impreso en el transceptor que funcione como antena, de manera que se ahorre espacio; sin embargo, se logra una menor cobertura que con una antena whip.
- Conector U.FL: Es un conector RF diseñado para frecuencias altas y usado para el ahorro de espacio.
- Conector RPSMA: Es un conector RF coaxial utilizado como interfaz para conectar el dispositivo XBee a un cable coaxial o para conectarse directamente con una antena externa.

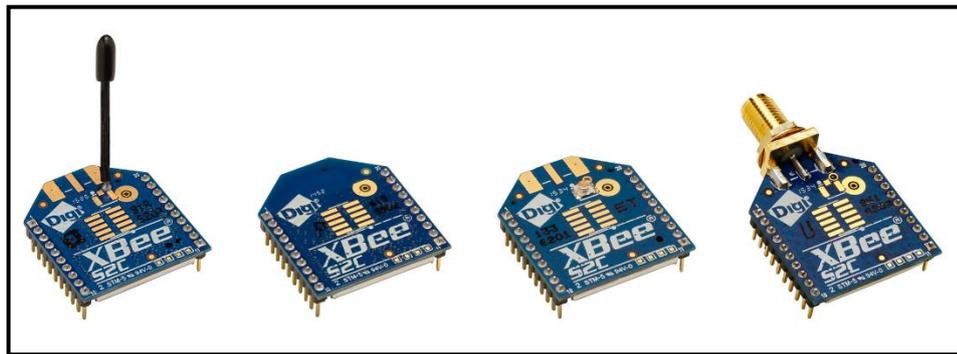


Figura 4.3. Tipos de antenas en módulos XBee. [48]

Entre estos módulos RF, se ha escogido el XBee S2C (frecuencia de operación de 2.4 GHz) con antena Wire.

- **Sensor Dual**

Se utilizarán dos sensores para el monitoreo de la presencia de un vehículo: un sensor de ultrasonido y un sensor magnético.

- **Sensor de Ultrasonido**

El sensor de ultrasonido a utilizar es el módulo HCSR-04 de Micropik. El dispositivo es un módulo con salida digital que posee un sensor de ultrasonido analógico; este módulo se puede conectar directamente a un microcontrolador para la lectura, por lo que no se necesitaría un acondicionamiento de señal adicional ya que ya posee uno. Las especificaciones de este dispositivo se presentan en la Figura 4.4.

La desventaja del sensor es que se debe alimentar con 5 V, lo que lo diferencia del resto del circuito. Los pocos sensores ultrasónicos con alimentación de 3.3 V en el mercado tienen un precio muy elevado.

El sensor debe ser capaz de medir la distancia al suelo del vehículo ocupando el espacio. Uno de los vehículos con mayor distancia al suelo es el modelo Ford F-150

Raptor, esta distancia tiene un valor de 29.21 cm (11.5 in); así, se programa el nodo sensor de manera que si se lee un obstáculo a menos de 30 cm, es probable que sea un vehículo. Para introducir un margen de error, se colocó en los requerimientos un rango máximo de 50 cm, distancia que la gran mayoría de sensores ultrasónicos pueden medir. [49]

SENSOR DE ULTRASONIDO



Figura 4.4. Especificaciones del módulo HC-SR04. [Elaboración Propia]

o Sensor Magnético

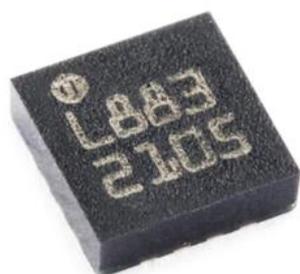
El otro sensor a utilizar es el sensor HMC5883L de Honeywell (las especificaciones son mostradas en la Figura 4.5). Este es un sensor que utiliza el efecto túnel magnético (MTJ) para el monitoreo de la variación del campo magnético. La alimentación de este sensor puede ser de 3.3 V. El sensor es un circuito integrado el cual se comunica mediante el sistema de comunicación serial I²C. Utilizando resistencias pull-up como acondicionamiento de señal en los pines de comunicación (SDA y SCL) se puede controlar este sensor con el microcontrolador de manera efectiva.

La magnitud que se quiere detectar es la intensidad de campo magnético total $L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ la cual será igual a la intensidad del campo magnético de la Tierra en la ubicación del sensor, más la variación producida por el vehículo. Esta variación no es constante, pero se pueden dar valores típicos, como se puede observar en la Tabla 4.2, ello en función a la distancia del vehículo. [50]

Tabla 4.2. Distancia entre un sensor y un vehículo vs. Variación de CM del vehículo.
[50]

Distancia	Magnitud en un vehículo (Densidad de flujo)
30.48 cm	270 mili Gauss
91.44 cm	75 mili Gauss
152.40 cm	10 mili Gauss
304.80 cm	2 mili Gauss

SENSOR MAGNÉTICO



ESPECIFICACIONES	REQUERIMIENTOS	HMC5883L
VCC	3.3 V; 5 V	2.16 – 3.6 V
ICC	<< 25 mA	100 μ A
ICC (Reposo)	<< 50 μ A	2 μ A
Sensibilidad	> 1 LSB/ μ T	2.3 LSB/ μ T
Resolución	< 0.5 μ T	0.07 μ T
Costo	---	\$ 6.95

Figura 4.5. Especificaciones del circuito integrado HMC5883L. [Elaboración Propia]

• Microcontrolador

Inicialmente, hay que obtener los requerimientos del microcontrolador. En lo que respecta al número de pines GPIO, se sabe que el nodo debe estar inactivo ciertos periodos, por lo que se debe controlar la alimentación de los dos sensores, cada una con un pin digital del microcontrolador. Además, se debe utilizar otro pin para controlar la hibernación del dispositivo XBee. De igual manera, se necesitan dos pines digitales más para la comunicación con el sensor de ultrasonido (Trigger y Echo); y se necesitan dos pines analógicos (SDA y SCL) para la comunicación I2C con el sensor magnético, así como un ADC como entrada del nivel de tensión de la batería. Por último, se necesitan dos pines digitales de transmisión serial (Rx y Tx) para la interacción con el transceptor XBee. Finalmente, se necesitaría un pin digital como entrada, para el monitoreo del nivel de tensión de la batería, como método de prevención del agotamiento de esta.

MICROCONTROLADOR



ESPECIFICACIONES	REQUERIMIENTOS	ATMEGA328
VCC	3.3 V; 5 V	1.8 – 5.5 V
ICC	<< 25 mA	< 3.6 mA
ICC (Reposo)	<< 50 μ A	0.5 μ A
Comunicación UART	Sí	Sí
Comunicación I2C	Sí	Sí
Pines Digitales	> 5 pines	PD2-7 (6 pines)
Pines Analógicos	SDA – SCL	PC0-5 (6 pines)
WDT Timeout	Máximo posible	8 s (Máximo)
Costo	---	\$ 3.37

Figura 4.6. Especificaciones del microcontrolador ATMEGA328. [Elaboración Propia]

Parte del código para comunicar el microcontrolador con el sensor ultrasónico requiere una interrupción externa que el circuito integrado debe tener. Asimismo, para entrar en el Power-Down Mode (modo en que se consume el mínimo de corriente), se utiliza el Watchdog Timer (WDT) cuyo tiempo de finalización o *timeout* debe ser el mayor posible.

Según los requerimientos indicados, el microcontrolador escogido es el ATMEGA328 (las especificaciones se muestran en la Figura 4.6). La alimentación de este dispositivo será de 3.3 V, y ya que el sensor HC-SR04 tiene otra alimentación (5 V) el circuito debe adaptar estos dos componentes.

- **Fuente de alimentación**

La fuente de alimentación será una batería de 9 V y capacidad de carga de 400 mAh. Para reducir la tensión a 3.3 V y 5 V se utilizarán los reguladores MCP1702-33 y MCP1702-50 respectivamente. La alimentación del dispositivo ZigBee, del microcontrolador y del sensor magnético es de 3.3 V, mientras que la alimentación del sensor ultrasónico es de 5 V. Estos reguladores tienen la particular característica de tener una reducida corriente de reposo (Quiescent Current), característica importante ya que estos seguirán en operación cuando los demás dispositivos estén inactivos. Las especificaciones de los reguladores MCP1702 en general se encuentran en la Figura 4.7.

REGULADORES DE TENSIÓN



ESPECIFICACIONES	REQUERIMIENTOS	MCP
V-IN	9 V	2.7 – 13.2 V
ICC (Reposo)	<< 50 μ A	2 μ A
I-OUT	> 100 mA	250 mA
Costo	---	\$ 0.48

Figura 4.7. Especificaciones del regulador MCP1702. [Elaboración Propia]

Análisis de la central de monitoreo

La Figura 4.8 presenta la arquitectura del nodo coordinador. Los componentes de esta sección son un transceptor ZigBee (coordinador de la red), una PC que funcionará como servidor, y un adaptador de comunicación entre el transceptor y el servidor. Además, el último de los componentes es la fuente de alimentación para el sistema, que simplemente pasa a ser la red eléctrica de 220 VAC que alimenta a la PC, y esta a su vez da energía al transceptor.

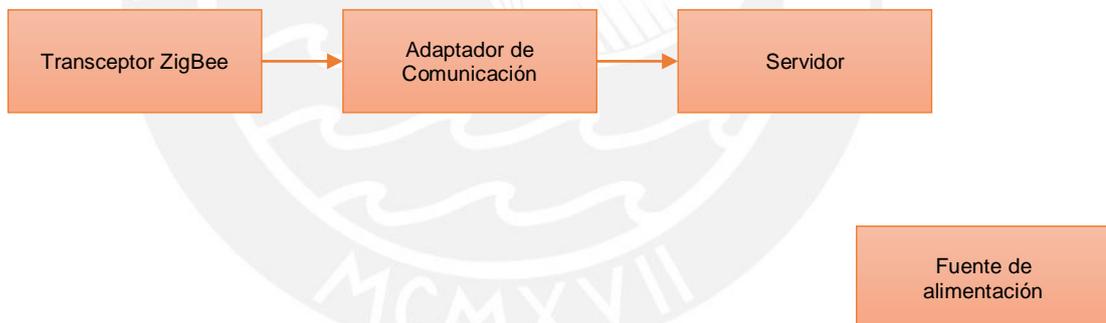


Figura 4.8. Arquitectura de la central de monitoreo. [Elaboración propia]

De igual forma que en los nodos sensores, el transceptor ZigBee es el dispositivo XBee S2C. La configuración, sin embargo, será distinta ya que en esta parte no se necesita ahorrar energía. El XBee necesita un adaptador de comunicación: el XBEE / USB de Gravitech sirve de manera sencilla para conectarse al servidor mediante el puerto USB. La Figura 4.9 muestra una imagen de la conexión entre estos elementos.

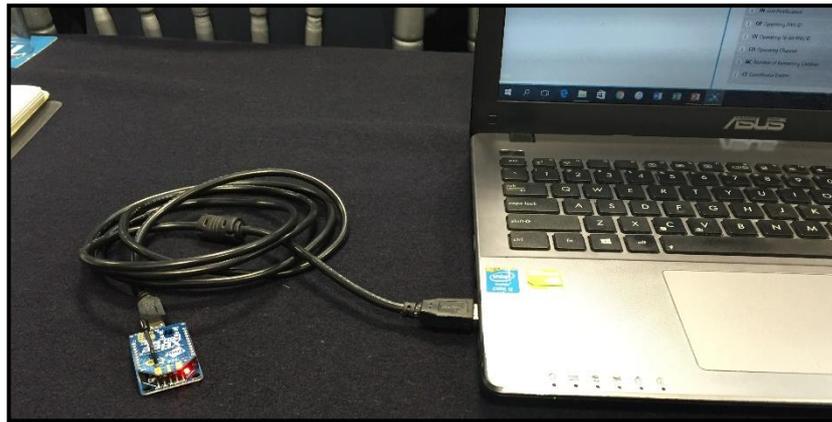


Figura 4.9. Conexión entre el XBee Coordinador y una PC. [Elaboración Propia]

Una PC de escritorio funcionará como el servidor de la red, esta almacenará los datos de comunicación e información en una base de datos, además de generar la página web a la cual los usuarios pueden acceder. Para realizar estas tareas se necesitan los siguientes programas:

- **IntelliJ IDEA**

IntelliJ IDEA es un entorno de desarrollo integrado (IDE) utilizado para programación en lenguajes Java, Python y lenguajes web. El *software* permitirá crear un programa en Java que pueda monitorear los datos que recibe el XBee coordinador y actualizar la base de datos generada en la PC.

- **MySQL**

Entre los gestores de bases de datos presentados en el capítulo anterior, se ha preferido utilizar MySQL, ya que presenta varias ventajas frente a la competencia como su facilidad de uso, compatibilidad con varios sistemas operativos e integración con el lenguaje PHP.

- **Apache Tomcat**

Apache Tomcat es un servidor web usado tradicionalmente en proyectos Java. Este es un contenedor de Servlets que se puede usar para compilar y ejecutar aplicaciones web realizadas en Java. Implementa y da soporte tanto a Servlets como a páginas JSP (Java Server Pages) o Java Sockets. Tomcat puede funcionar de manera autónoma como motor de aplicaciones web desarrolladas con Java, aunque habitualmente se usa en combinación con otros productos.

Análisis del *display*

La Figura 4.10 presenta la arquitectura del nodo coordinador. Los componentes mostrados son un transceptor ZigBee, un *hardware* de control de datos y una pantalla informativa; además de la fuente de alimentación respectiva.

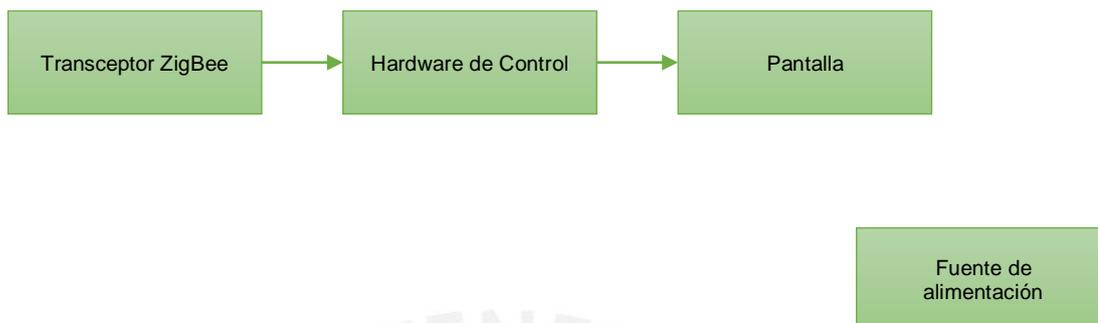


Figura 4.10. Arquitectura del *display*. [Elaboración propia]

Una vez más, el transceptor ZigBee debe ser el mismo dispositivo: XBee S2C. Por otro lado, se debe utilizar un controlador que utilice los datos del XBee para generar los números en la pantalla. Para llevar a cabo esta actividad, se escogió el dispositivo Arduino Micro. Arduino presenta una IDE sencilla para llevar a cabo la programación.

PANTALLA



ESPECIFICACIONES	REQUERIMIENTOS	DISPLAY 7 SEGMENTOS DE SPARKFUN
VCC	3.3 V; 5V; 12 V	12 V
Rango de visión	> 20 m	30 m
Longitud de onda	---	642 nm (rojo)
Intensidad luminosa	---	300 mcd
Costo	---	\$ 14.95

Figura 4.11. Especificaciones del *display* de 7-segmentos de 6.5" de SparkFun. [Elaboración Propia]

La pantalla, por su parte, estará basada en *display* de 7 segmentos de 6.5 pulgadas (16.5 cm), ofrecidos en SparkFun. En la Figura 4.11 se presentan sus respectivas especificaciones. Se necesitan 4 de estos elementos para mostrar los estacionamientos de tipo común disponibles, dos para cada cara del monitor, para que se puedan apreciar los dígitos desde ambos lados de la vía.

Para cada *display* se necesitará un módulo ofrecido también por SparkFun conocido como Large Digit Driver, el cual utiliza un registro de desplazamiento para convertir data serial en paralela, y el cual puede conectarse con otros *drivers* para juntar varios dígitos. El diagrama de conexiones de los elementos del *display* se puede encontrar en el Anexo 7.

Por último, la fuente de alimentación de esta parte del sistema es la red eléctrica. Se necesita un regulador a tensión DC para alimentar los componentes. Afortunadamente, existen en el mercado varios adaptadores de tensión de red eléctrica a 12 VDC, con un costo moderado. El Arduino Nano se alimentará con esta tensión continua, mientras que este dispositivo alimentará al resto mediante el pin V_{in} (Large Digit Drivers) y el pin 3.3 VDC (Módulo XBee).

4.3. Cálculos de diseño

4.3.1. Diseño y funcionamiento

La Figura 4.12 da cuenta de un modelo del diseño del sistema de monitoreo. En él se puede apreciar que se asume que las tres secciones (nodos sensores, central de monitoreo y *display*) se pueden comunicar inalámbricamente sin problemas. Esto se tendrá que comprobar en el dimensionamiento de la red.

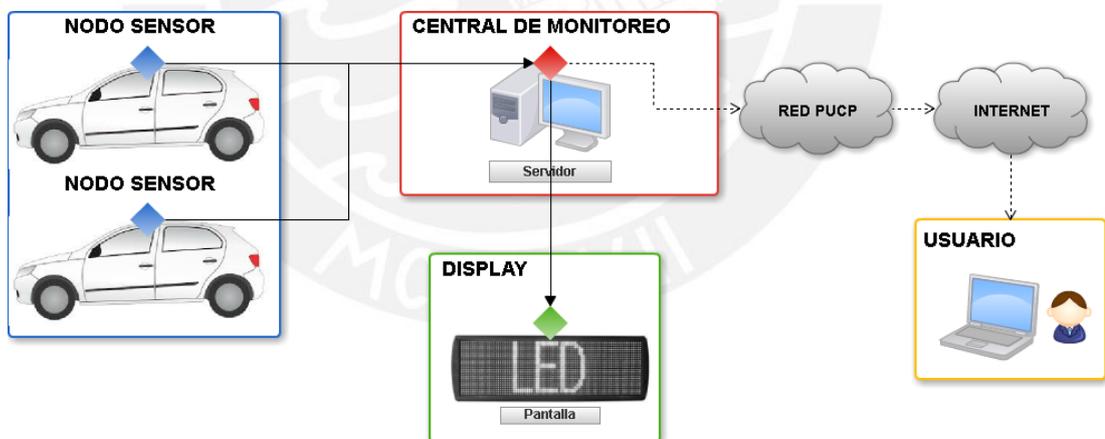


Figura 4.12. Diagrama del sistema de monitoreo de espacios de estacionamiento.

[Elaboración Propia]

Por un lado, se tienen los nodos sensores. Hay que señalar que cada nodo sensor está ubicado en el suelo de una plaza de estacionamiento y está conformado por los siguientes dispositivos: Un par de sensores (sensor ultrasonido y sensor magnético) con su respectivo acondicionamiento de señal, un transceptor XBee, un microcontrolador ATMEGA328 y una fuente de alimentación, que en este caso es

una batería. Ambos sensores sirven como un sensor dual que determina la presencia de un vehículo: el sensor de ultrasonido determina la presencia de un obstáculo, mientras que el sensor magnético determina si este obstáculo es un automóvil. El acondicionamiento de señal proporcionará los datos de entrada del microcontrolador suficientes para que el código programado funcione correctamente. El microcontrolador, entonces, determinará si acaba de estacionarse un auto o no; esta respuesta será enviada mediante el protocolo ZigBee hacia el coordinador.

En lo que se refiere a la central de monitoreo, en ella el coordinador XBee de la red se encuentra conectado mediante un adaptador XBee/USB a una PC, en donde se ha generado una base de datos. Esta base de datos almacenará el estado de cada espacio del estacionamiento y estará enlazada con un servidor web, de modo que los usuarios pueden ingresar a las páginas web diseñadas desde un dispositivo con acceso a internet.

Asimismo, el nodo coordinador utiliza estos datos obtenidos para comunicarse con el nodo que se encuentra en el *display* del estacionamiento. Esta parte del sistema está conformado por otro módulo XBee, el cual recibe los datos del coordinador, una pantalla que muestre los espacios disponibles de estacionamiento y un Arduino Micro que transforma la información obtenida del coordinador en señales eléctricas para la pantalla, la cual servirá de guía para los conductores.

Según el sistema completo, el conductor tiene la opción de revisar previamente el estacionamiento desde algún dispositivo con acceso a internet, sea este teléfono móvil o laptop, u observar en la pantalla del estacionamiento al ingresar a la PUCP. Para futuras investigaciones, se puede expandir la red inalámbrica de sensores de tal forma que abarque todos los estacionamientos de esta casa de estudios.

Esquemáticos

Los esquemáticos mostrarán los dispositivos utilizados en cada nodo sensor, y sus respectivas conexiones. La Figura 4.13 y la Figura 4.14 muestran estos esquemáticos, realizados en el *software* Eagle. Para una mejor visualización de estos diagramas, se puede revisar el Anexo 8.

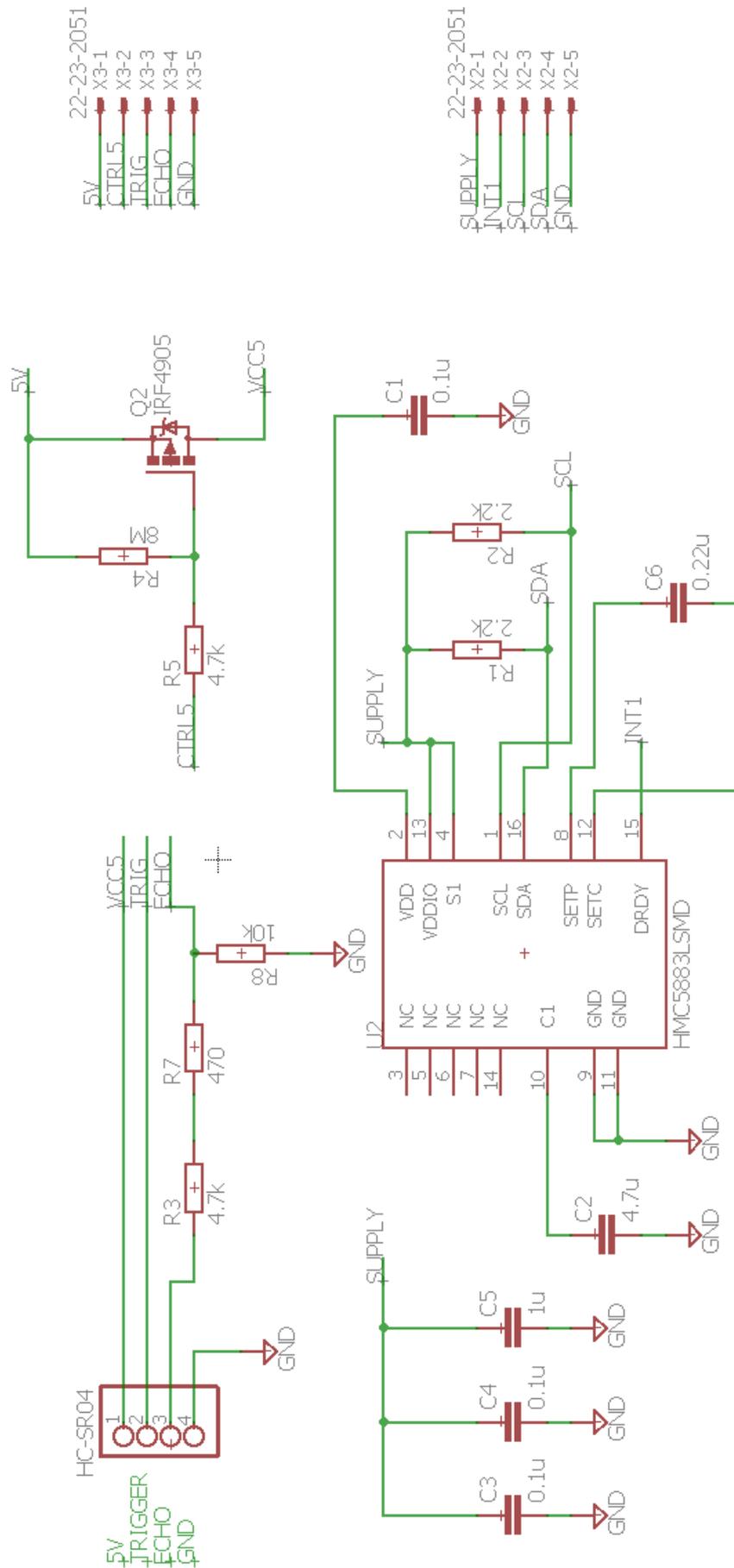


Figura 4.13. Esquemático de los sensores HC-SR04 y HMC5883L. [Elaboración propia]

Cálculo del consumo de corriente promedio

El funcionamiento de un nodo sensor tiene periodos cíclicos, divididos en periodos de actividad y periodos de inactividad. Según el código programado en el ATMEGA328, generado en el *software* Atmel Studio, cada periodo tiene una duración total de 8.030132 s, en donde 8 segundos representan el periodo de inactividad; y los 30.132 ms restantes, el periodo de actividad. En la Tabla 4.3 se muestran las instrucciones u operaciones de mayor duración en el programa que suponen un consumo de corriente significativo.

En conclusión, se obtiene la siguiente corriente promedio consumida:

$$I_p = 91.8 \mu A$$

Tabla 4.3. Cálculo del consumo promedio de corriente en un nodo sensor.

[Elaboración Propia]

Dispositivo	Operación/Instrucción	Duración (ms)	Corriente (mA)
HC-SR04	Encender alimentación	0.05	3
	Limpiar datos del Trigger	2×10^{-3}	3
	Leer Echo	0.01	15
	Desactivar alimentación	0.05	3
HMC5883L	Encender alimentación	0.01	0.1
	Desactivar alimentación	0.01	0.1
XBee S2C	Instrucción Wake Up	10	23
	Transmisión de trama e Instrucción Sleep	20	23
	Sleep Mode	8×10^3	10^{-3}
ATMEGA328	Actividad	30.132	0.2
	Inactividad	8×10^3	10^{-4}
MCP1702-33	Actividad	8×10^3	2×10^{-3}
MCP1702-5	Actividad	8×10^3	2×10^{-3}

Para una batería con una capacidad de 400 mAh, se puede deducir el tiempo de vida estimado de esta forma:

$$Tiempo\ de\ vida = \frac{400\ mAh}{91.8 \times 10^{-3}\ mA} = 4357\ h \approx 180\ días$$

Se puede apreciar que la corriente es menor a 100 μ A, valor que se había definido como el máximo consumo promedio de corriente para obtener una duración aceptable de la batería.

4.3.2. Modelamiento y ubicación de los componentes

Cada una de estas secciones del proyecto debe estar ubicada eficientemente en el área de trabajo. Los nodos sensores tienen la alternativa de estar en tres posiciones diferentes en relación al vehículo: debajo del vehículo, al frente de este o encima de este. Se decidió por ubicarlo debajo del auto, debido a que no se necesitaría una estructura adicional que lo sostenga, y debido a que el monitoreo de la distancia al vehículo es en la mayoría de los casos constante.

De esta manera, se ubica el nodo sensor debajo del vehículo, y en el centro del espacio para estacionar como lo indica la Figura 4.15.

Las desventajas serían que el chasis del nodo debe ser resistente al peso de un vehículo, en el caso particular en que uno pase por encima. Además, el nodo estará propenso a lluvias, polvo y humedad.

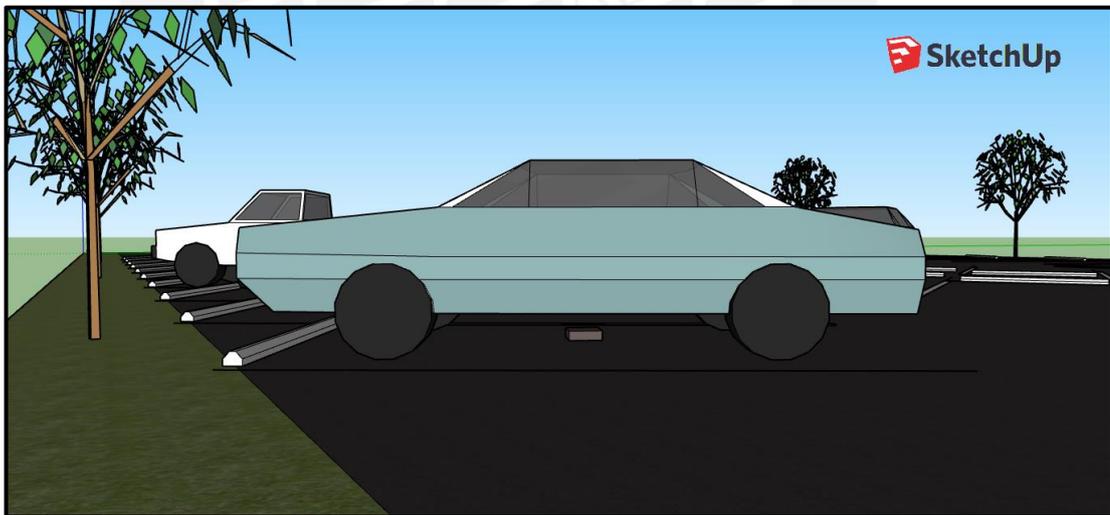


Figura 4.15. Modelo de la ubicación del sensor debajo del vehículo y al centro de la plaza. [Elaboración propia]

Por ello, el chasis puede estar hecho de PC/ABS (policarbonato/acrilonitrilo butadieno estireno), una mezcla de compuestos que combina la facilidad de procesado del ABS y la resistencia a impactos y al calor del PC. El modelamiento del encapsulado se muestra en la Figura 4.16, realizado con el software SketchUp Make.

El nodo sensor tiene una forma elipsoidal; su tamaño es de 20 cm de diámetro, con una altura de aproximadamente 4 cm. Está diseñado de manera que solo se deba pegar al asfalto, y en caso de que un vehículo pase por encima accidentalmente, este no se detendría por el dispositivo. La cara superior se diseñó de color transparente en el *software* solo para que se puedan apreciar los componentes internos.

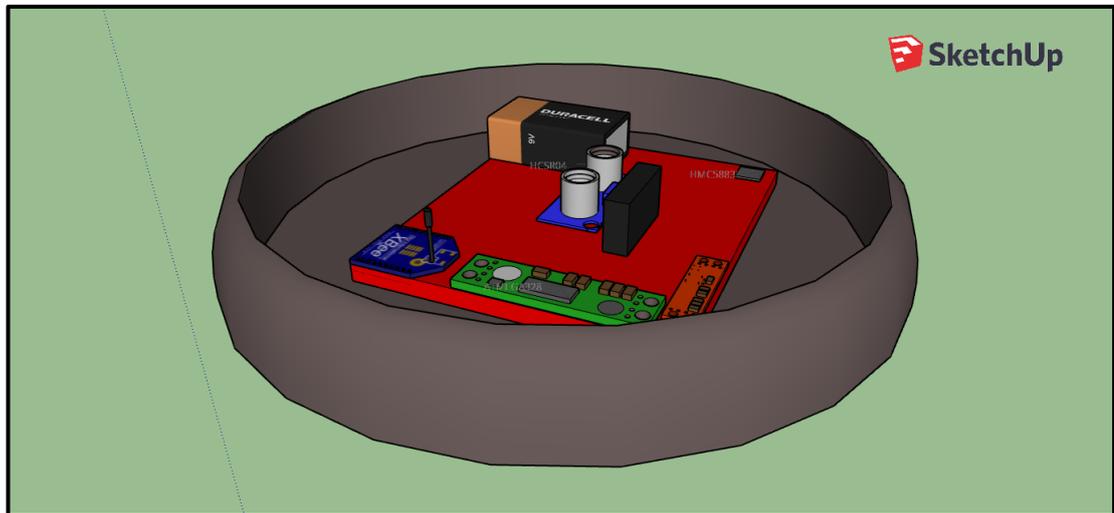


Figura 4.16. Modelo 3D del nodo sensor. [Elaboración Propia]

Para obtener una topología física centralizada, la central de monitoreo estará ubicada en el centro de todo el estacionamiento como se puede apreciar en la Figura 4.17.

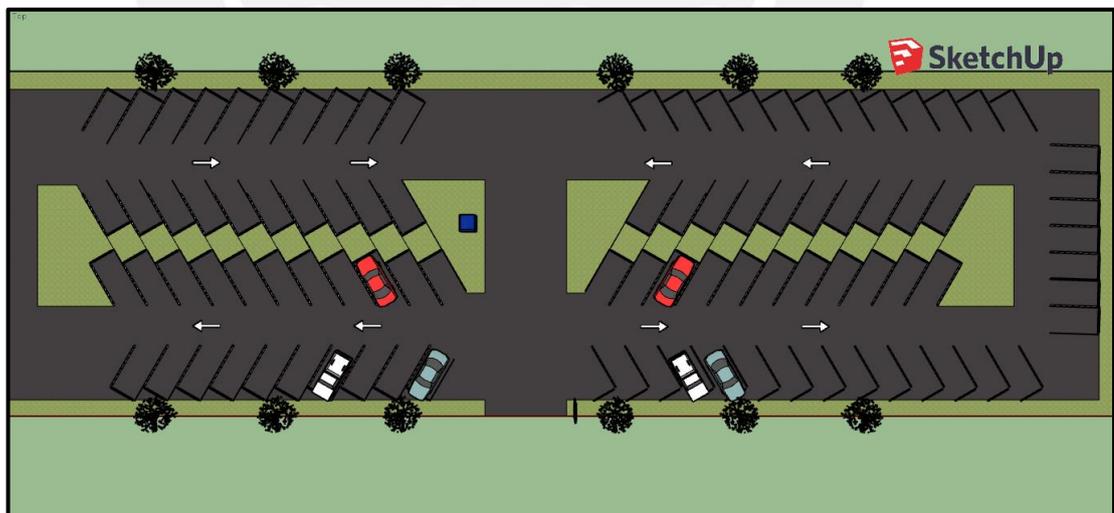


Figura 4.17. Modelo del estacionamiento con la ubicación de la estación de monitoreo (cabina azul). [Elaboración propia]

Por último, se mencionó que el *display* se encontrará ubicado en la entrada del estacionamiento. En la Figura 4.18 da una idea del modelo terminado. Estos modelos presentados pueden ser revisados en el Anexo 11.

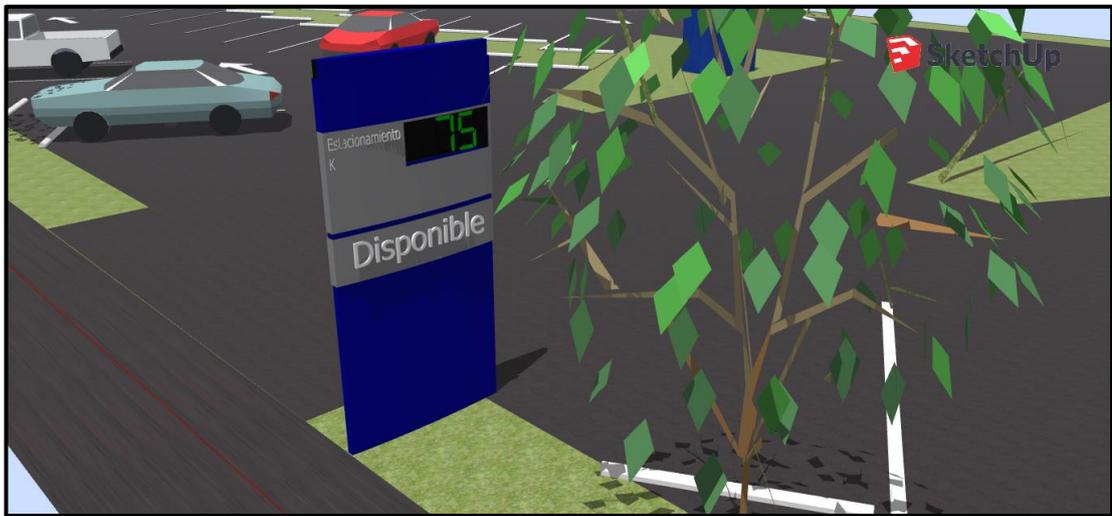


Figura 4.18. Modelo del *display* en la entrada del estacionamiento. [Elaboración propia]

4.4. Simulación y Pruebas

4.4.1. Configuración de módulos XBee

Configuración de parámetros en XCTU

Los módulos de comunicación XBee ZigBee pueden comunicarse en dos modos: modo AT y modo API. En el modo AT o transparente, la información que el usuario envía o recibe es únicamente el payload de la trama en XBee. Es decir, para que el usuario envíe la palabra “Disponible” simplemente debe redactarla en el monitor del *software* XCTU. No obstante, en el modo API se permite la configuración de los bytes de la trama de envío, de manera que se tiene un control total de los datos que se envían, el tipo de trama, entre otros parámetros.

El modo que se utilizará en los dispositivos XBee es el modo API. Las tramas enviadas están representadas en la Figura 4.19; cabe resaltar que esta trama siempre se envía, sin importar el modo que se escoja, simplemente en el modo API se pueden modificar más parámetros de esta, ya que en modo AT solo se modifica la data.

Start delimiter	Length		Frame type	Frame data							Checksum
				Data							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	n	n+1
0x7E	MSB	LSB	API frame type	Data							Single byte

Figura 4.19. Trama API. [48]

Todas las tramas empiezan con un byte que especifica el comienzo de esta, y siempre posee el mismo valor (0x7E); este está seguido por la longitud de la trama, cuya longitud es de 2 bytes, y la cual especifica el número de bytes desde el que le sigue a este parámetro hasta el penúltimo byte. Estos parámetros son considerados como la cabecera de la trama, y la data de la trama está compuesta por el tipo de trama, de 1 byte de longitud, y el payload, cuya longitud varía. Por último, siempre se envía un byte de verificación de trama denominado checksum para corroborar que el mensaje no presente errores.

Gracias al *software* XCTU, modificamos los parámetros de los cuatro dispositivos XBee que se dispone: Dos nodos sensores, un nodo coordinador y un nodo *router* (*display*). En la Tabla 4.4 se presenta la configuración principal de los módulos. Los parámetros en negrita no se pueden modificar.

Además de los parámetros principales, es necesario configurar las medidas correspondientes al Sleep Mode. Este modo de operación ocasiona que el módulo deshabilite sus funciones básicas y consuma el mínimo de corriente necesario. Existen dos tipos generales de Sleep Mode:

- Sleep Mode Cíclico: Los dispositivos se despiertan periódicamente y sincrónicamente en un tiempo designado. Este método es una ventaja en redes Malla para tener *routers* en Sleep Mode pero requiere un consumo mayor de energía para la sincronización.
- Pin Hibernate: Los dispositivos despiertan según el estado del pin SLEEP_RQ (PIN 9). Ideal para que un microcontrolador controle el tiempo activo del XBee.

Así, se ha escogido el modo Pin Sleep para la configuración de los nodos sensores.

Tabla 4.4. Configuración de los módulos XBee en XCTU. [Elaboración Propia]

Parámetro	Descripción	Nodo Sensor 1	Nodo Sensor 2	Nodo Coordinador	Nodo Display
ID	Pan ID	5055	5055	5055	5055
CH	Canal de operación	0x11	0x11	0x11	0x11
CE	Coordinador	[0] Off	[0] Off	[1] On	[0] Off
SH	Número Serial H	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200
SL	Número Serial L	4104855C	410485BC	410485C8	414EE44C
PL	Nivel de Potencia de Transmisión	[2] Medio (+1 dBm)	[2] Medio (+1 dBm)	[4] Máximo (+5 dBm)	[4] Máximo (+5 dBm)
PM	Modo de Potencia	[0] Boost Mode Off	[0] Boost Mode Off	[1] Boost Mode On	[1] Boost Mode On
D7	DIO7	[0] Off	[0] Off	Default	Default
AP	AT / API	[1] API	[1] API	[1] API	[1] API
SP	Periodo cíclico de hibernación	Default	Default	7D0	Default
SN	Número de periodos cíclicos de hibernación	Default	Default	3	Default
SM	Sleep Mode	[1] Pin Hibernate	[1] Pin Hibernate	[0] No Sleep	[0] No Sleep

Por su parte, el coordinador también debe cambiar su configuración. Cuando los nodos sensores están inactivos, este no puede identificar los XBee remotos de cada uno. Si el coordinador espera demasiado tiempo a un nodo sensor inactivo, eliminará su dirección de red de su tabla de direcciones, por lo que ya no podrá ser enviado un paquete de ese nodo. Por defecto, espera menos de 1 segundo a un dispositivo remoto inactivo. Para solucionar este inconveniente, se deben cambiar los valores de espera del coordinador (SP y SN). El coordinador entonces debe esperar más de 8 segundos a los nodos sensores; por ello, se determina un tiempo de espera de 3 minutos con el fin de asegurar la recepción de paquetes de cada uno.

Dimensionamiento de la red

Según las especificaciones de los módulos XBee ZigBee, presentadas en la Figura 4.20, los transceptores tienen una cobertura de dispositivo de un máximo de 1200 m en exteriores y con línea de vista. Sin embargo, en el presente estudio los módulos RF no tienen línea de vista, ya que gran parte del tiempo se encontrarán obstruidos por un vehículo. Además, estos valores son máximos teóricos mostrados por la empresa Digi con la finalidad del marketing de sus productos.

Specification	XBee ZigBee S2C	XBee-PRO ZigBee S2C	XBee ZigBee S2D
Indoor/urban range	Up to 200 ft. (60 m)	Up to 300 ft. (90 m)	Up to 200 ft. (60m)
Outdoor RF line-of-sight range	Up to 4000 ft. (1200 m)	Up to 2 miles (3200 m)	Up to 4000 ft. (1200m)
Transmit power output (maximum)	6.3mW (+8 dBm), boost mode 3.1mW (+5 dBm), normal mode Channel 26 max power is +3dBm	63mW (+18 dBm)	6.3 mW (+8 dBm) Channel 26 max power is +1 dBm
RF data rate	250,000 b/s		
Receiver sensitivity	-102 dBm, boost mode -100 dBm, normal mode	-101 dBm	-102 dBm, boost mode -100 dBm, normal mode

Figura 4.20. Especificaciones XBee y XBee PRO. [48]

Es necesario, entonces, una simulación del dimensionamiento de la red. Se necesita estimar la cobertura de cada dispositivo, sea un nodo sensor, *router* o coordinador. La prueba se realizó con dos dispositivos XBee conectados sin línea de vista (obstruidos por un vehículo). El objetivo es hallar empíricamente el valor del exponente de path-loss n en el estacionamiento K de la universidad, utilizando el indicador de fuerza de señal recibida (RSSI) que provee la aplicación XCTU. Se sabe que este valor está en el rango de 2 a 5 en exteriores. Los valores que se tienen son los siguientes:

- Potencia de transmisión (dBm): P_{Tx} es el valor de la potencia con la que el módulo XBee está transmitiendo. Para efectos prácticos, se utilizó la potencia máxima con Boost Mode (+8 dBm) y sin Boost Mode (+5 dBm).
- Potencia de recepción (dBm): P_d es la potencia que recibe el segundo módulo XBee a una distancia d .
- Distancia (m): d es la distancia entre el receptor y el transmisor. Este valor irá variando en cada muestra.
- Frecuencia (MHz): f tiene un valor de 2435 MHz mientras esté en el canal 0x11, ya que esta es la frecuencia central de este canal.
- Shadow Fading Margin (dB): SFM es la variación de potencia de señal debido a obstáculos que obstruyen el camino que recorre. Se puede calcular utilizando la probabilidad de recepción; sin embargo, para simplificar los cálculos debido al

tiempo limitado que se posee para el presente estudio, se le puede otorgar un valor de 12 dB para asegurar la transmisión.

- Sensibilidad del receptor (dBm): S_r es la mínima potencia que puede recibir el segundo módulo XBee para una comunicación exitosa. Esta sensibilidad es de -102 dBm con Boost Mode y de -100 dBm sin Boost Mode.

Otros factores como las pérdidas en los cables y las ganancias en las antenas son considerados nulos, debido a que los cables de conexión son muy cortos para representar una pérdida significativa y las antenas de los módulos son omnidireccionales.

$$L_c = 0 \text{ dB} \quad G_{Tx} = 0 \text{ dBi} \quad G_{Rx} = 0 \text{ dBi}$$

Por lo tanto, las pruebas de RSSI realizadas se muestran en la Tabla 4.5. En el Anexo 12, se pueden verificar los valores de RSSI medidos gracias a XCTU. Al final, se obtuvo un promedio del exponente de path-loss:

$$n = 3.072$$

Una vez obtenido este valor se puede hacer una estimación de rango. En primera instancia, el coordinador y los *routers* de la red no necesitan ahorro de batería ya que obtienen corriente de la red eléctrica, por lo que se usará la máxima potencia de transmisión posible (+8 dBm) y su sensibilidad en la recepción será de -102 dBm. En segunda instancia, los módulos XBee en los nodos sensores tendrán una potencia de transmisión de +1 dBm y una sensibilidad de recepción de -100 dBm. Por tanto se tiene lo siguiente:

- Radio de comunicación entre *routers*:

$$R = 10^{\left(\frac{+8-12-(-102)-10 \times 3.072 \times \log 2435 + 30 \times 3.072 - 32.44}{10 \times 3.072}\right)}$$

$$R = 55.953 \text{ m}$$

- Radio de comunicación entre nodos sensores y *routers*:

$$R = 10^{\left(\frac{+8-12-(-100)-10 \times 3.072 \times \log 2435 + 30 \times 3.072 - 32.44}{10 \times 3.072}\right)}$$

$$R = 48.163 \text{ m}$$

Tabla 4.5. Resultados de las pruebas RSSI en el estacionamiento K. [Elaboración Propia]

Po (dBm)	Pr (dBm)	Distancia (m)	RSSI Local (dB)	n
8	-102	6.6	-56	2.6168223
8	-102	9.9	-63	2.7898884
8	-102	16.5	-74	3.0898085
8	-102	26.4	-89	3.5705933
8	-102	33	-87	3.2839673
8	-102	39.6	-81	2.8505275
8	-102	49.5	-86	2.9580451
5	-100	16.5	-83	3.4638773
5	-100	33	-89	3.2314742
5	-100	49.5	-87	2.8619423

Según los datos obtenidos, se aprecia que los nodos sensores no tienen la cobertura suficiente para comunicarse con el coordinador (la distancia entre la central de monitoreo y el espacio de estacionamiento más alejado es de 140 m). Debido a esto, se necesitarían dos dispositivos XBee adicionales que funcionen como *routers*, de manera que se concrete la comunicación desde cualquier punto del estacionamiento. Los módulos XBee utilizan la topología malla, por lo que los nodos sensores se conectarán a los módulos más cercanos de la red. La distancia entre el coordinador y el *display* sí está dentro de la cobertura (15 m).

Distribución de los elementos de red para la simulación

Una vez realizado el dimensionamiento, se presenta en la Figura 4.21 el diseño completo de la red para la simulación. Cabe recalcar que el servidor es el punto final del trabajo.

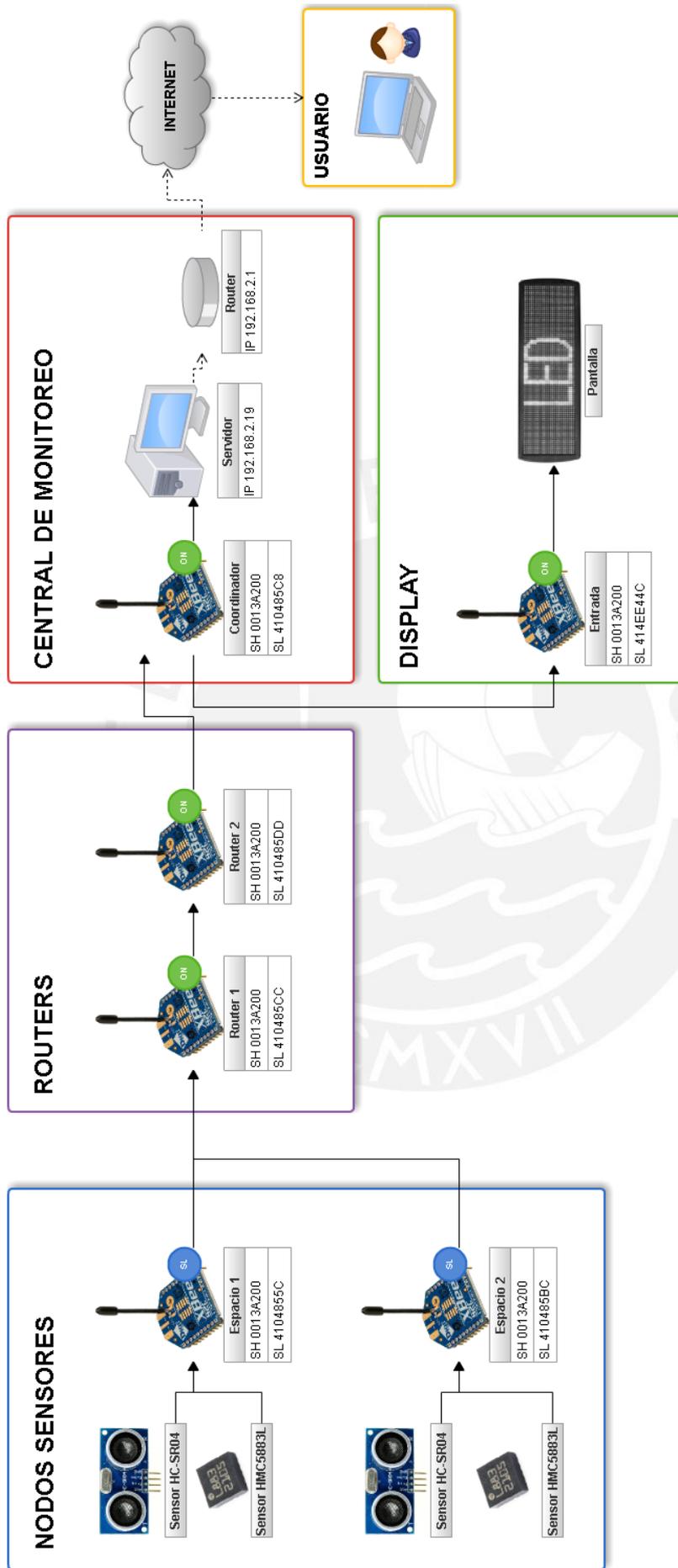


Figura 4.21 Distribución de los elementos de red para la simulación. [Elaboración Propia]

4.4.2. Configuración del software de gestión

En la Figura 4.22 se puede apreciar un diagrama del *software* de gestión de datos en la PC, la cual funciona como el Core de la red inalámbrica de sensores. La PC utilizará la IDE IntelliJ IDEA para la comunicación con el dispositivo XBee. El programa cumple exitosamente la tarea de recibir tramas del coordinador y validarlas según sea el caso.

En la Figura 4.23 se muestran los resultados de las lecturas. Una vez obtenida una trama, el programa valida la información pertinente de cada recepción: el nodo sensor remitente (dirección MAC) y el estado de los espacios de estacionamiento. De esta manera, el *software* actualiza la base de datos y la página web con los datos obtenidos, luego envía estos datos al nodo ubicado en el *display*.

La página web desarrollada es mostrada en la Figura 4.24. Esta página es responsiva, quiere decir que su diseño se adapta a todos los tamaños de pantallas posibles de forma dinámica (PC, Tablet, Smartphone), así se puede ofrecer una experiencia de visita óptima para todos los posibles dispositivos de acceso.

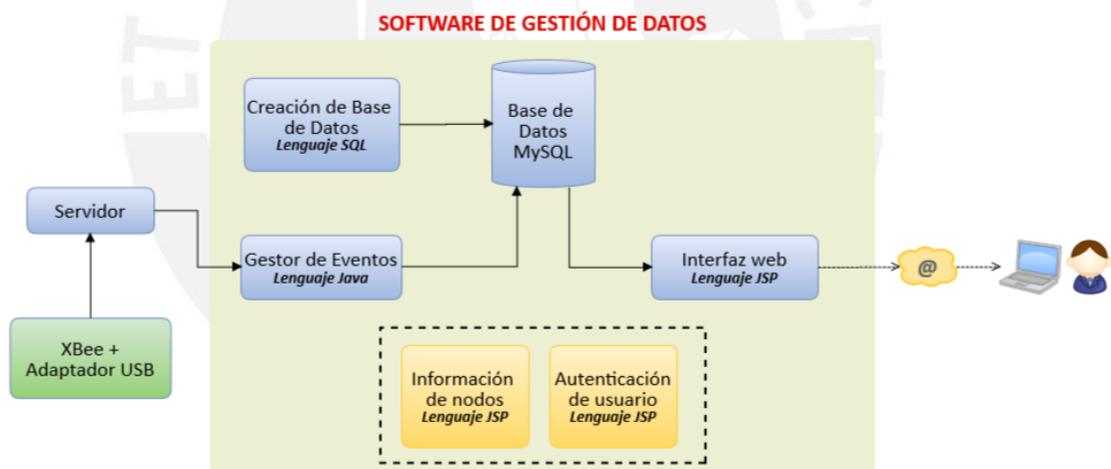


Figura 4.22. Diagrama del *software* de gestión de datos en el servidor. [Elaboración Propia]

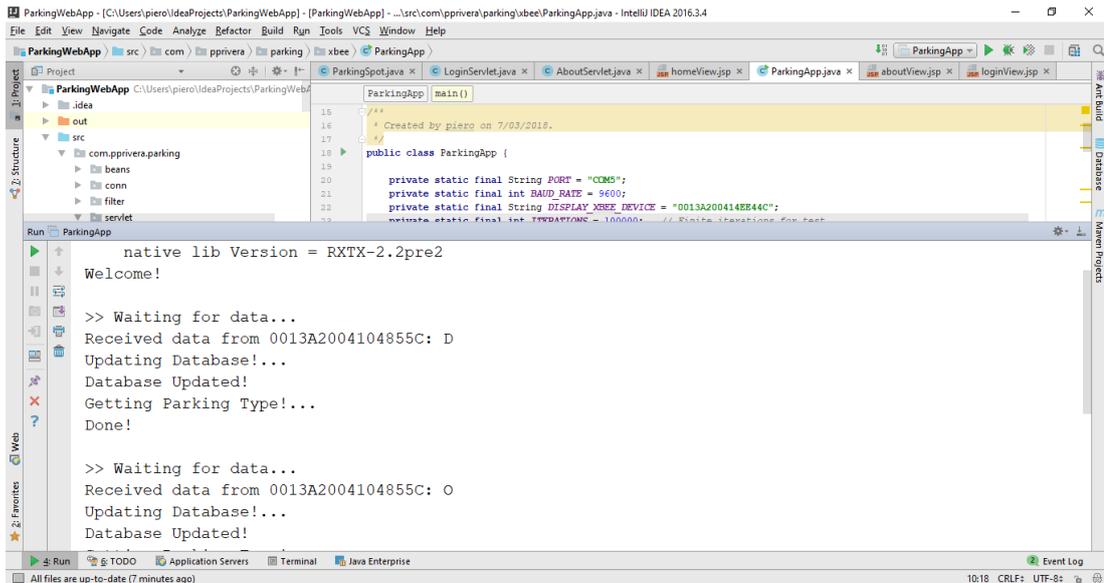


Figura 4.23. Resultados de las lecturas de datos del coordinador XBee. [Elaboración Propia]

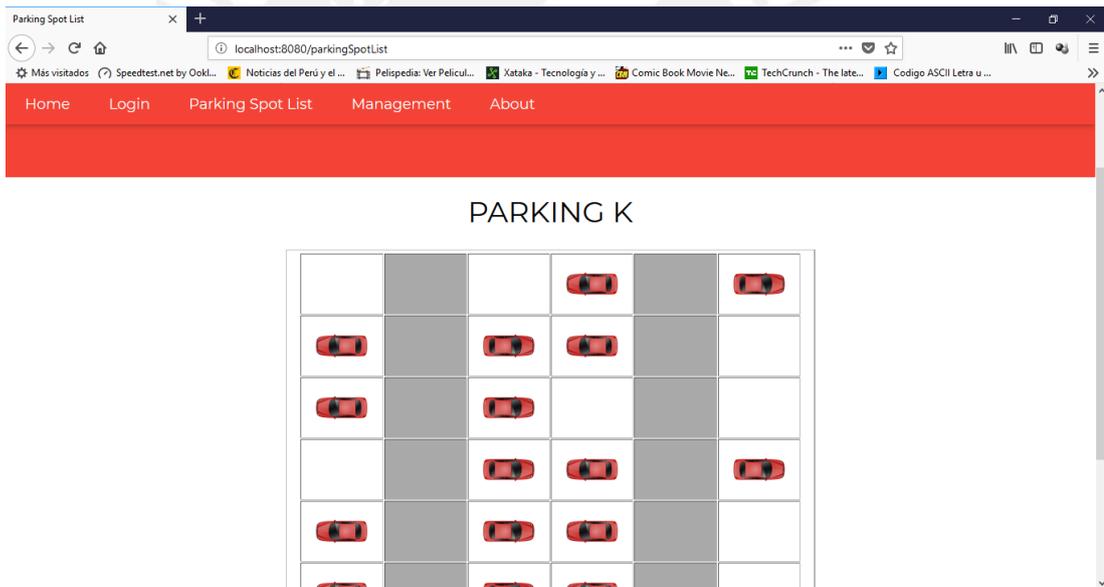


Figura 4.24. Página web de prueba de los dos estacionamientos. [Elaboración Propia]

4.4.3. Pruebas de comunicación

A continuación se describen varias pruebas de comunicación que se realizaron previo a la conclusión del diseño de la red inalámbrica de sensores.

Envío y recepción de tramas API

Se realizó una prueba de recepción y transmisión de tramas API en el protocolo de la tecnología XBee. Para ello, se utilizó el *software* XCTU para visualizar los

resultados. Cada XBee se puede conectar a una PC mediante un adaptador de XBee a USB. El XBee transmisor y el XBee receptor se colocan en modo API y, en el *software* XCTU, se genera una trama de transmisión de datos. Las tramas en la transmisión y la recepción tienen la forma mostrada en la Figura 4.25.

Transmit Request	(API 1)
7E 00 0F 10 00 00 13 A2 00 41 04 85 C8 FF FE 00 00 44 67	
Receive Packet	(API 1)
7E 00 0D 90 00 13 A2 00 41 04 85 5C 01 D0 01 44 7E	

Figura 4.25. Tramas API de transmisión y recepción. [Elaboración Propia]

En las siguientes tablas se presentan las pruebas de recepción de tramas para identificar los estados de los estacionamientos. En la Tabla 4.6, se muestra las tramas que pueden ser recibidas por el coordinador, en donde el nodo remitente está sombreado de color azul (nótese que existen los nodos transmisores son los dos nodos sensores) y la información del estado, con color rojo. Este último byte representa el primer caracter del nombre del estado.

Tabla 4.6. Tramas recibidas por el coordinador con el estado de los estacionamientos. [Elaboración Propia]

Tramas recibidas por el Coordinador	Estado
7E 00 0D 90 00 13 A2 00 41 04 85 5C 98 D7 01 44 E0	Disponible
7E 00 0D 90 00 13 A2 00 41 04 85 BC 98 D7 01 4F D5	Ocupado
7E 00 0D 90 00 13 A2 00 41 04 85 5C 98 D7 01 45 DF	Error de Lectura
7E 00 0D 90 00 13 A2 00 41 04 85 BC 98 D7 01 42 E2	Batería Baja

Por otro lado, en la Tabla 4.7 se muestran las tramas recibidas por el *display*, información enviada por el coordinador de la red. En ellas, se especifica como payload el cambio de estado y el tipo de estacionamiento. El byte que representa al tipo, al igual que en tabla anterior, es el primer caracter del nombre de este. Por otro lado, el byte que representa al cambio de estado puede ser igual a tres caracteres distintos: “M” cuando un espacio se ha desocupado, “L” cuando un espacio se ha ocupado, y “N” cuando no ocurrió ningún cambio en el estado.

Tabla 4.7. Tramas recibidas en el *display* con el cambio de estado y el tipo de estacionamiento. [Elaboración Propia]

Tramas recibidas por el <i>router</i> (<i>Display</i>)	Cambio de Estado	Tipo
7E 00 0E 90 00 13 A2 00 41 04 85 C8 00 00 01 48 43 9C	Se desocupó	Común
7E 00 0E 90 00 13 A2 00 41 04 85 C8 00 00 01 4C 50 8B	Se ocupó	Preferencial
7E 00 0E 90 00 13 A2 00 41 04 85 C8 00 00 01 4E 52 87	Ninguno	Reservado

Pruebas de conectividad

Se utilizaron las herramientas de RSSI del *software* XCTU para hacer una prueba de la señal recibida en los dispositivos XBee desplegados en el estacionamiento. En la Figura 4.26 se aprecia un diagrama de la ubicación de los nodos y la distancia entre cada uno, se puede apreciar que la potencia recibida es mayor a la sensibilidad de los módulos, por lo que la comunicación es exitosa.

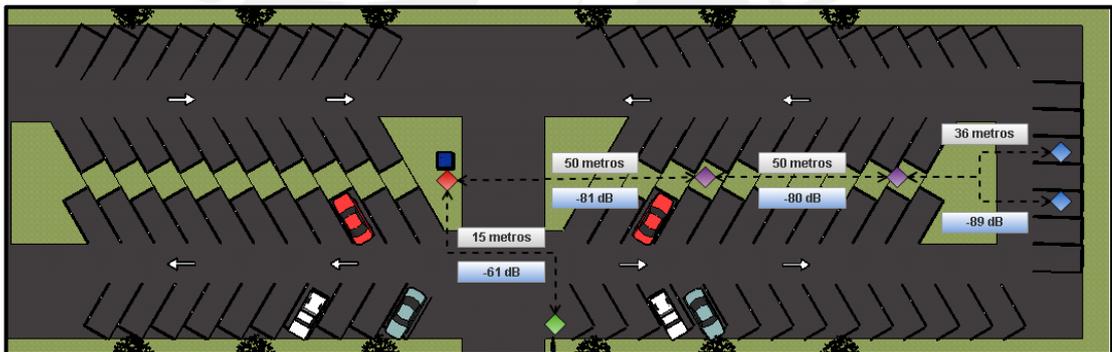


Figura 4.26. Pruebas de conectividad de los módulos XBee. [Elaboración Propia]

4.5. Costo de inversión

En este punto se presenta el costo de inversión para el desarrollo de la presente tesis (ver Tabla 4.8). El presupuesto incluye los costos de los equipos, *software*, materiales utilizados y el servicio de ingeniería para esta solución.

Tabla 4.8. Presupuesto para el desarrollo del sistema de monitoreo. [Elaboración Propia]

Costo de equipos y materiales			
Descripción	Costo por unidad (\$)	Cantidad	Total (\$)
Módulo RF / XBee ZigBee S2C Antena Wire	17.50	6	105
Sensor Ultrasónico HC-SR04	1.92	2	3.84
Sensor Magnético HMC5883L	6.95	2	13.90
Microcontrolador ATMEGA328	3.37	2	6.74
Otros componentes (Nodo sensor)	7.82	2	15.64
Adaptador USB / XBee	18.95	1	18.95
PC (Propiedad de la entidad)	0	1	0
XBee Explorer Regulated	9.95	1	9.95
Display de 7 segmentos (6.5")	14.95	2	29.90
Large Digit Driver	6.95	2	13.90
Arduino Micro	24.95	1	24.95
Subtotal			242.77
Costo de software			
Descripción	Costo (\$)	Cantidad	Total (\$)
Dominio de la página web (Propiedad de la entidad)	30	1	30
Subtotal			30
Costo de servicios de ingeniería			
Descripción	Costo diario (\$)	Días	Total (\$)
Recolección de datos: Área de trabajo	150	1	150
Diseño de la red	300	15	4500
Implementación de la red	150	5	750
Pruebas y validación	150	4	600
Subtotal			6000
Costo adicional (10% del total)			
Costo total de diseño e implementación			6900

4.6. Comparación de presupuestos

El costo de un nodo sensor se estima en unos 47 dólares (ver Tabla 4.9), considerando los dispositivos y materiales. Si se realiza una equiparación entre el costo de los nodos sensores del sistema planteado en el presente trabajo y el costo de otros productos encontrados en línea, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El precio promedio de los nodos para estacionamientos (productos de vendedores sobresalientes) supera aproximadamente en 2.2 veces al costo de los nodos propuestos.
- Este precio se incrementa aún más si se considera el costo de envío.

La información se ha obtenido de proveedores destacados en el portal de ventas Alibaba, y se encuentra incluida en los Anexos.

Tabla 4.9. Presupuesto de un nodo sensor. [Elaboración Propia]

Descripción	Costo por unidad (\$)	Cantidad	Total (\$)
Módulo RF / XBee ZigBee S2C Antena Wire	17.50	1	17.50
Sensor Ultrasónico HC-SR04	1.92	1	1.92
Sensor Magnético HMC5883L	6.95	1	6.95
Microcontrolador ATMEGA328	3.37	1	3.37
Otros componentes (Nodo sensor)	7.82	1	7.82
Materiales para la implementación	10	1	10
Total			47.56

CONCLUSIONES

- El diseño de la solución cumple con los requerimientos definidos para cada elemento de la red ya que proporciona un sistema de monitoreo de espacios disponibles eficiente y confiable. La simulación del funcionamiento del sistema permite concluir en la correcta operación de los dispositivos de comunicación y los elementos de monitoreo de espacios. En cuanto al presupuesto obtenido, se demuestra que los módulos ZigBee son una tecnología de bajo costo en relación a otros protocolos como WiFi, Bluetooth o GSM.
- Las lecturas del sensor dual de cada nodo son precisas. En primer lugar, el sensor de ultrasonido puede detectar un obstáculo a 30 cm. En segundo lugar, el sensor magnético puede monitorear la variación de campo magnético que genera un vehículo mediano promedio. Además, el sistema cumple eficientemente con la gestión de recursos limitados debido a que el tiempo de vida de cada nodo sensor es mayor a 160 días.
- La administración de la red a través de una base de datos y una página web permite monitorear el estado de los espacios de estacionamiento, no solo para el beneficio de los usuarios, sino también para gestionar la calidad de servicio de los nodos, como en el caso de los estados de batería baja y el posible error de lectura del sensor ultrasónico.
- El presente diseño de la red inalámbrica de sensores tiene una escalabilidad apreciable; es decir, permite integrar nuevos dispositivos a la red, de manera que se puede monitorear todos los espacios del estacionamiento K. Ahora, se puede utilizar la red privada de la PUCP para interconectar centrales de monitoreo en cada uno de los estacionamientos de la universidad, si se pretende ampliar aún más la red de sensores.

RECOMENDACIONES

- Para poder desplegar una red en todo el estacionamiento K de la universidad, se necesitaría más dispositivos *routers* (20 en total) debido a que cada uno de estos módulos XBee puede soportar un máximo de 14 dispositivos terminales conectados. No obstante, no representa una desventaja mayor dado que, en general, puede existir hasta un total de 65 536 direcciones de red en una misma red inalámbrica de sensores con protocolo ZigBee. Debido a la alta escalabilidad de este protocolo, se recomienda ampliar la red para toda la universidad. Por último, este sistema de monitoreo está diseñado para estacionamientos no cubiertos; es decir, estacionamientos al aire libre que no están bajo techo. Esta clase de estacionamientos son los más comunes en las calles de Lima Metropolitana. Por tanto, se puede utilizar el diseño propuesto para los aparcamientos públicos de la ciudad, de manera que se produzca una mejora en el tráfico vehicular actual.
- Para conseguir un mayor ahorro de batería se puede utilizar varias instrucciones del *timeout* del WDT en el microcontrolador, de manera que los periodos inactivos sean más largos; esto a costo de una menor frecuencia de monitoreo, lo que significaría una menor confiabilidad de la red.
- La página web no se encuentra asociada a un dominio, por lo que se recomienda esta tarea para la implementación final de la red inalámbrica de sensores. Asimismo, se puede realizar varias mejoras en el diseño de la página para que sea más dinámica y amigable; de hecho, se puede crear una aplicación móvil que beneficiaría en gran medida a los usuarios, ya que es mucho más probable que un usuario prefiera revisar la disponibilidad de espacios vehiculares desde una aplicación móvil que desde un navegador web.
- Si se pretende ampliar la red a otros estacionamientos, se sugiere agregar una pantalla adicional en el *display* de cada uno, de manera que se muestre los espacios disponibles del estacionamiento más próximo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Rye, «Gestión de Estacionamientos: Una Contribución hacia Ciudades más amables,» [En línea]. Disponible:
http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB2_Land-Use-Planning-and-Demand-Management/GIZ_SUTP_SB2c_Parking-Management_ES.pdf. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [2] A. Bielsa, «Smart Parking and environmental monitoring in one of the world's largest WSN,» Liberium, 22 Febrero 2013. [En línea]. Disponible:
http://www.libelium.com/smart_santander_smart_parking/. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [3] D. Newcomb, «We're No. 1: U.S. Tops List Of The World's Most Traffic-Congested Cities,» Forbes, 6 Febrero 2018. [En línea]. Disponible:
<https://www.forbes.com/sites/dougnewcomb/2018/02/06/were-number-one-u-s-tops-list-of-the-worlds-most-traffic-congested-cities/#25238edc4712>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [4] C. Calle, Sistemas de estacionamiento (Tesis de pregrado), Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2014.
- [5] E. Morris, «La necesidad de que Lima sea una smart city,» 23 Junio 2018. [En línea]. Disponible:
<https://www.esan.edu.pe/sala-de-prensa/2018/06/la-necesidad-de-que-lima-sea-una-smart-city/>. [Último acceso: 24 Junio 2018].
- [6] Perú21, «Venta de autos nuevos marcó un nuevo récord en 2012,» 5 Enero 2013. [En línea]. Disponible:
<http://peru21.pe/economia/venta-autos-nuevos-marco-nuevo-record-2012-2111057>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [7] Publímetro, «Carpooling: compartir autos para reducir el caos vehicular y ahorrar algo de dinero,» 17 Septiembre 2015. [En línea]. Disponible:
<http://publometro.pe/actualidad/noticia-carpooling-compartir-autos-reducir-caos-vehicular-y-ahorrar-algo-dinero-38593?ref=ecri>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].

- [8] Gestion.pe, «Por cada 50 m² debe contarse con un estacionamiento,» [En línea]. Disponible:
<https://archivo.gestion.pe/suplementos/cada-50-m2-contarse-estacionamiento-2150670>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [9] El Comercio, «"¿Déficit de estacionamientos?", por Angus Laurie,» 27 Marzo 2016. [En línea]. Disponible:
<http://elcomercio.pe/lima/ciudad/deficit-estacionamientos-angus-laurie-noticia-1889535>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [10] Los Portales, «Los Portales - Estacionamientos,» [En línea]. Disponible:
<http://www.losportales.com.pe/estacionamientos/>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [11] Expreso, «Manuel Velarde plantea el uso de parquímetros en Lima,» 25 Febrero 2018. [En línea]. Disponible:
<http://www.expreso.com.pe/actualidad/manuel-velarde-plantea-uso-parquimetros-lima/>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [12] M. R. Correa, «Bienvenida del rector,» PUCP, [En línea]. Disponible:
<http://www.pucp.edu.pe/la-universidad/nuestra-universidad/bienvenida-del-rector/>. [Último acceso: 8 Agosto 2016].
- [13] Google, «Google Maps,» [En línea]. Disponible:
<https://www.google.com.pe/maps>. [Último acceso: 3 Octubre 2016].
- [14] Anónimo, Entrevistado, Actividades de un trabajador de Los Portales en la PUCP. [Entrevista]. 1 Julio 2016.
- [15] Pontificia Universidad Católica del Perú, «Estacionamiento K,» Descubre PUCP, [En línea]. Disponible:
<http://descubre.pucp.edu.pe/poi/est006>. [Último acceso: 2 Agosto 2016].
- [16] J. P. Benson, T. O'Donovan, P. O'Sullivan, U. Roedig, C. Sreenan, J. Barton, A. Murphy y B. O'Flynn, «Car-Park Management using Wireless Sensor Networks,» de Proceedings. 2006 31st IEEE Conference on Local Computer Networks, 2006.
- [17] NEDAP Mobility, «Smart Parking in Les Mureaux, France,» [En línea]. Disponible: <http://www.nedapmobility.com/on-street-parking/cases/smart-parking-in-les-mureaux-france>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].

- [18] CIRCONTROL, «Circontrol presents its global efficient parking concept for shopping centers,» [En línea]. Disponible: <http://circontrol.com/circontrol-presents-its-global-efficient-parking-concept-for-shopping-centers/>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [19] M. Mundaca, Entrevistado, Entrevista al Ing. Manuel Mundaca sobre su proyecto de domótica con equipos XBee. [Entrevista]. 7 Junio 2016.
- [20] S. Juárez, Entrevistado, Entrevista al Ing. Samuel Juárez sobre el proyecto de monitoreo de estacionamientos con módulos WiFi. [Entrevista]. 22 Diciembre 2017.
- [21] J. Chang, «Tuco: The Stress-Free Parking Experience,» [En línea]. Disponible: <http://tuco.com/>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [22] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam y E. Cayirci, «A Survey on Sensor Networks,» IEEE Communications Magazine, vol. 40, nº 8, pp. 102-114, 2002.
- [23] J. N. Al-Karaki y A. E. Kamal, «Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey,» IEEE Wireless Communications, vol. 11, nº 6, pp. 6-28, 2004.
- [24] R. Faludi, Building Wireless Sensor Networks: with ZigBee, XBee, Arduino, and Processing, California: O'Reilly Media, 2011.
- [25] National Instruments, «Five Factors to Consider When Implementing a Wireless Sensor Network (WSN),» 27 Junio 2012. [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com/white-paper/10789/en/>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [26] E. Callaway, P. Gorday, L. Hester, J. A. Gutierrez, M. Naeve, B. Heile y V. Bahl, «Home Networking With IEEE 802.15.4: A Developing Standard For Low-Rate Wireless Personal Area Networks,» IEEE Communications Magazine, vol. 40, nº 8, pp. 70-77, 2002.
- [27] Cisco DocWiki, «Ethernet Technologies,» [En línea]. Disponible: http://docwiki.cisco.com/wiki/Ethernet_Technologies. [Último acceso: 22 Marzo 2018].

- [28] G. Ding, Z. Sahinoglu, B. Bhargava, P. Orlik y J. Zhang, «Reliable Broadcast in ZigBee Networks,» 2005 Second Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, pp. 510-520, 2005.
- [29] A. Wheeler, «Commercial Applications of Wireless Sensor Networks Using ZigBee,» IEEE Communications Magazine, vol. 45, nº 4, pp. 70-77, 2007.
- [30] V. C. Gungor y G. P. Hancke, «Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches,» IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, nº 10, pp. 4258-4265, 2009.
- [31] Future Electronics, «Comparison of Wireless Technologies,» [En línea]. Disponible:
http://www.fut-electronics.com/wp-content/plugins/fe_downloads/Uploads/Comparison%20of%20Wireless%20Technologies.pdf. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [32] N. Baker, «ZigBee and Bluetooth Strengths and Weaknesses for Industrial Applications,» Computing & Control Engineering Journal, vol. 16, nº 2, pp. 20-25, 2005.
- [33] LinkLabs, «ZigBee Vs. Bluetooth: A Use Case With Range Calculations,» 24 Agosto 2015. [En línea]. Disponible:
<https://www.link-labs.com/zigbee-vs-bluetooth/>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [34] L. Freznel, «What's The Difference Between ZigBee And Z-Wave?,» 29 Marzo 2012. [En línea]. Disponible:
<http://electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-zigbee-and-z-wave>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].
- [35] J.-S. Lee, Y.-W. Su y C.-C. Shen, «A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi,» de Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE, 2007.
- [36] Revista Mundo HVACR, «Ventilación en estacionamientos,» [En línea]. Disponible:
<https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2014/06/ventilacion-en-estacionamientos/>. [Último acceso: 22 Marzo 2018].

- [37] G. Proaño Braganza, Estudio técnico comparativo de redes LAN álmbricas e inalámbricas (Tesis de pregrado), Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2009.
- [38] Mouser Electronics, «Zigbee / 802.15.4 Modules,» [En línea]. Disponible: http://www.mouser.com/Embedded-Solutions/RF-Wireless-Modules/Zigbee-802154-Modules/_/N-6I7r4/. [Último acceso: 21 Abril 2016].
- [39] Society of Robots, «Infrared vs. Ultrasonic,» [En línea]. Disponible: http://www.societyofrobots.com/member_tutorials/node/71. [Último acceso: 11 Agosto 2016].
- [40] S. Latorre, «[Arduino 08] Medir distancia con sensor ultrasónico HR-SR04,» 9 Septiembre 2015. [En línea]. Disponible: <http://sebalabs.blogspot.pe/2015/09/arduino-08-medir-distancia-con-sensor.html>. [Último acceso: 12 Agosto 2016].
- [41] Digikey Electronics, «Página Principal,» [En línea]. Disponible: <http://www.digikey.pe/>. [Último acceso: 12 Agosto 2016].
- [42] British Geological Survey, «The Earth's Magnetic Field: An Overview,» [En línea]. Disponible: <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>. [Último acceso: 7 Septiembre 2016].
- [43] A. Sivakumar, «#HowTo Detect vehicle presence or movements with magnetometers,» 30 Septiembre 2015. [En línea]. Disponible: <http://blog.nxp.com/connected-car/howto-detect-vehicle-presence-or-movements-with-magnetometers>. [Último acceso: 6 Septiembre 2016].
- [44] DB-Engines, «System Properties Comparison Microsoft SQL Server vs. MySQL vs. PostgreSQL,» [En línea]. Disponible: <http://db-engines.com/en/system/Microsoft+SQL+Server%3BMySQL%3BPostgreSQL>. [Último acceso: 1 Octubre 2016].
- [45] D. Rodríguez y S. Delgado, «VERSUS: IntelliJ IDEA VS Eclipse,» 19 Abril 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.paradigmigital.com/dev/versus-intellij-idea-vs-eclipse/>. [Último acceso: 25 Marzo 2018].

- [46] S. Farahani, ZigBee Wireless Networks and Transceivers, Massachusetts: Newnes, 2011.
- [47] E. Velarde, «Intranet PUCP - Comunicaciones Móviles: Link Budget y Modelos de Propagación,» 2016.
- [48] Digi International, «DIGI,» [En línea]. Disponible: <https://www.digi.com/>. [Último acceso: 16 Octubre 2016].
- [49] Ford, «F-150 - Especificaciones,» [En línea]. Disponible: <http://es.ford.com/trucks/f150/specifications/view-all/>. [Último acceso: 4 Octubre 2016].
- [50] Honeywell, «Vehicle Detection Using AMR Sensors,» [En línea]. Disponible: https://aerospace.honeywell.com/en/~media/aerospace/files/application-note/an218_vehicle_detection_using_amr_sensors.pdf. [Último acceso: 26 Octubre 2016].

