

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

ESCUELA DE POSTGRADO



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**Implementación de una metodología para la medición de la
interferencia inalámbrica en la banda ISM en zonas exteriores urbanas
para garantizar la comunicación de una red inalámbrica de sensores**

**Tesis para optar el título de Magister en Ingeniería de las
Telecomunicaciones**

Julio César Santiago Asto

Asesor: Mg. Pastor David Chávez Muñoz

Julio 2017

Resumen

Las aplicaciones de redes inalámbricas de sensores por lo general son desplegadas en entornos donde ya existe comunicación inalámbrica que hacen uso de las bandas ISM y licenciadas. Los dispositivos inalámbricos que utilizan la banda ISM como redes WiFi, Bluetooth, o dispositivos de control remoto, proliferan en las calles causando interferencia entre ellos; por lo que en este ambiente contaminado de radiación electromagnética un dispositivo inalámbrico que trabaja en la banda ISM estará expuesto a las interferencias, razón por lo que la comunicación tendrá muchas probabilidades de fallar en cualquier momento disminuyendo la transferencia de datos o anulándolo por completo, por lo tanto es necesario hacer un estudio previo que permita conocer la zona de despliegue.

La red de sensores inalámbricas implementado en el Proyecto 153-FINCYT está pensado para ser desplegado en una zona de interés que pueden ser una avenida, una zona residencial o cualquier ambiente exterior para realizar la medición de los contaminantes de aire. La red de sensores utiliza el estándar IEEE802.15.4 en la banda ISM 2.4 GHz y de 900MHz, por lo que su despliegue en estas zonas exteriores hará que se degrade la comunicación entre el nodo sensor y la puerta de salida (Gateway) por causa de las interferencias electromagnéticas.

La tesis tiene como objetivo implementar una metodología que permita ayudar y dar recomendaciones al diseño, a la implementación, pruebas y despliegue de redes de sensores inalámbricas IEEE 802.15.4 en 2.4GHz en ambientes externos. Para esto se ha analizado estudios anteriores sobre el tema y se ha realizado pruebas de laboratorio y de campo para demostrar los efectos de interferencia en enlaces IEEE802.15.4 en 2.4GHz en ambientes urbanos externos. En la metodología se describe como identificar el tipo, grado y distribución de la interferencia en la zona donde se desplegaría la red inalámbrica de sensores.

A mi familia, por ser mi soporte y fuente de inspiración permanente.



AGRADECIMIENTOS

Al gran equipo del Grupo de Telecomunicaciones Rurales (GTR) de la PUCP por su ejemplo y apoyo en este proyecto.



INDICE GENERAL

Introducción	10
2. Análisis del problema.....	14
2.1 Antecedentes	14
2.2 Escenario de despliegue de la red de sensores 153-FINCYT.....	15
2.3 Efectos de la interferencia.	16
3. Análisis de la tecnología y estándares	17
3.1 Bandas ISM.	17
3.2 Redes de Sensores Inalámbricos.	18
3.2.1 Componentes de las Redes de Sensores Inalámbricos	19
3.2.2 Aplicaciones en Redes de Sensores Inalámbricos:.....	20
3.2.3 Directivas para implementar Redes de Sensores Inalámbricos:.....	20
3.2.4 Otros “retos” técnicos a afrontar en el diseño de Redes de Sensores Inalámbricos:21	
3.2.5 Criterios para toma de decisiones y evaluación de la eficiencia en Redes de Sensores Inalámbricos.....	22
3.3 Estándar IEEE 802.15.4.	23
3.3.1 Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4:.....	25
3.3.2 La capa física (PHY):.....	26
3.3.3 Distribución de canales para el estándar IEEE 802.15.4:.....	28
3.4 Estándares que operan en la banda de 2400 MHz.....	30
3.4.1 IEEE 802.11g:	30
3.4.2 IEEE 802.11n en 2.4 GHz:.....	31
3.4.3 IEEE 802.15.1 (FHSS) Bluetooth:	32
4. Análisis de los efectos de la interferencia IEEE 802.11 sobre enlaces IEEE 802.15.4.....	34
4.1 Análisis de la interferencia de la tecnología IEEE 802.11 (WiFi) sobre la tecnología IEEE 802.15.4 en 2.4GHz.	34
4.2 Análisis de la interferencia de la tecnología IEEE 802.15.1 (Bluetooth) sobre la tecnología IEEE 802.15.4 en 2.4GHz.	35
4.3 Pruebas de cobertura de un enlace punto a punto IEEE 802.15.4.....	36
4.4 Análisis y observaciones de la interferencia de la tecnología IEEE802.11 (WiFi) sobre la tecnología IEEE802.15.4 en 2.4GHz en ambientes internos.....	39
4.4.1 Mediciones de redes inalámbricas en ambientes internos.....	40
4.4.2 Pruebas de transferencia de tramas IEEE 802.15.4.....	40
4.5 Análisis y observaciones de la interferencia de la tecnología IEEE802.11 (WiFi) sobre la tecnología IEEE802.15.4 en 2.4GHz en ambientes externos.....	45

4.5.1	Mediciones de redes inalámbricas en ambientes externos.	45
4.5.2	Pruebas de transferencia de tramas IEEE 802.15.4.	55
5.	Desarrollo de la Metodología.	59
5.1	Diseño y pruebas en Laboratorio.	61
5.2	Medición en campo antes del despliegue.	64
5.3	Despliegue y pruebas en Campo.	66
6.	Discusiones.	68
6.1	Supuestos:	68
6.2	Alternativas al problema de la interferencia:	69
	Conclusiones	71
	Trabajos Futuros.....	73
	Bibliografía	74
	Anexos.....	77



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de la red de sensores inalámbricos y el sistema de información de Proyecto 153-FINCYT.	11
Figura 2: Nodo sensor del Proyecto 153-FINCYT. Fuente: Proyecto 153-FINCYT	11
Figura 3: Nodo sensor instalado y Puerta de Enlace (Gateway) del Proyecto 153-FINCYT. Fuente: Proyecto 153-FINCYT	12
Figura 4: Esquema de la distribución de nodos sensores y puertas de enlace en la Av. Abancay. Fuente: Proyecto 153-FINCYT	16
Figura 5: Estructura interna de un nodo sensor [10]	19
Figura 6: Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4 (LR-WPAN) [14]	26
Figura 7: Traslape entre canales de protocolos IEEE 802.11gn y IEEE 802.15.4. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 8: Traslape entre canales de protocolos IEEE 802.11n de 40 MHz e IEEE 802.15.4. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 9: Traslape entre canales de protocolos IEEE 802.15.1 y IEEE 802.15.4. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 10: Escenario de prueba de interferencia IEEE 802.11bgn y IEEE 802.15.4. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 11: Intensidad de redes inalámbricas en la oficina del GTR-PUCP.	40
Figura 12: Transmisión en Canal 15 (21) IEEE 802.15.4 sin interferencia IEEE 802.11bgn. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 13: Espectro centrado aproximadamente en 2454MHz para IEEE 802.15.4 canal 15 (21)	42
Figura 14: Canal 17 (11) IEEE802.15.4 dentro de canal 6 IEEE802.11g. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 15: Transmisión en Canal 17 (11) IEEE 802.15.4 con interferencia de canal 6 de IEEE 802.11bgn. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 16: Espectro en la frecuencia 2435MHz para el IEEE 802.15.4 canal 17 (11)	45
Figura 17: Comando realizado en el BaseBox2 para realizar escaneo de enlaces IEEE802.11. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 18: Módulo para la medición de la intensidad de señal de los AP en la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 19: Puntos de medición de la intensidad de señal de los AP en la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth.	47
Figura 20: Cantidad de AP detectados por cada punto de medición en el lado derecho de la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 21: Cantidad de AP detectados por cada punto de medición en el lado izquierdo de la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 22: Intensidad promedio de señal de los AP en la Av. La Mar en el lado derecho. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 23: Intensidad promedio de señal de los AP en la Av. La Mar en el lado izquierdo. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 24: Nodos para la prueba de transferencia de tramas. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 25: Distribución de nodos en la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth.	56

Figura 26: Retardo en ms en el enlace a un mismo lado de la calle. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 27: Retardo en ms en un enlace cruzado. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 28: Diseño de la red de sensores inalámbricos. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 29: Distribución típica de los equipos de una red de sensores inalámbricas. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 30: Puntos de medición en la calle. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 31: Mediciones de parámetros inalámbricos y de datos.	66
Figura 32: Modelo de tráfico. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 33: Implementación de tres radios IEEE802.15.4 para un mismo tráfico. Tomado de "Reducing Packet Losses in Networks of Commodity IEEE 802.15.4 Sensor Motes Using Cooperative Communication and Diversity Combination" [21].	70



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros máximos a tener en cuenta para la instalación de dispositivos inalámbricos [11].	18
Tabla 2: Redes inalámbricas de área personal - WPAN	24
Tabla 3: Sub-categorías de redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transmisión (LR-WPAN)	24
Tabla 4: Sub-categorías de redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transmisión [14]	27
Tabla 5: Sub-categorías de redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transmisión - Perú	28
Tabla 6: Centros de los canales para las bandas 868, 915 y 2450 MHz	29
Tabla 7: Listado de canales de operación de IEEE 802.11gn [18]	31
Tabla 8: Listado de canales de operación de IEEE 802.15.1 [20]	32
Tabla 9: Características del X-Bee-PRO en la banda de 2.4GHz.	36
Tabla 10: Pruebas de Nivel de Rx y de distancia.	38
Tabla 11: Intensidad promedio de la señal de los AP en la Av. La Mar.	49
Tabla 12: Intensidad de señal de los AP en la Av. La Mar en algunos puntos de medición.	51
Tabla 13: Resultado de la prueba de transmisión en la Av. La Mar.	56
Tabla 14: Metodología planteada para el diseño e implementación de redes inalámbricas.	60

ACRONIMOS

EMC	Electro Magnetic Compatibility
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ICM	Industrial, Científico, Médico
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
SNR	Signal-to-noise ratio
LR-WPAN	Low-rate Wireless Personal Area Network
PAN	Personal Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
PHY	PHysical Layer
MAC	Medium Access Control
CCA	Clear Channel Assessment
AFH	Adaptive Frequency Hopping
FINCYT	Fondo para la Innovación, la Ciencia y la Tecnología
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
WSN	Wireless Sensor Network
PER	Packet Error Rate
ITU	International Telecommunication Union
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
UWB	Ultra Wide Band
BAN	Body Area Network
OTA	Over The Air
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
ED	Energy Detection
LQI	Link Quality Indicator
SUN	Smart Utility Network
OSI	Open System Interconnection
RF	Radio Frequency
LLC	Logical Link Control
SSCS	Service Specific Convergence Sub-layer
PLME-SAP	Physical Layer Management Entity-Service Access Point
CCA	Clear Channel Assessment
BPSK	Binary Phase-Shift Keying

O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
GTS	Guaranteed Time Slot
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FCC	Federal Communications Commission
IC	Industry Canada
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
SMS	Short Message Service
GSM	Global System for Mobile Communications



Introducción

Este trabajo de tesis es parte del proyecto de investigación “Desarrollo de una Solución de bajo costo y rápido despliegue para el monitoreo de aire en zonas urbanas basada en redes inalámbricas de sensores (153-FINCYT-IA-2013)” y que fue desarrollado en el Grupo de Telecomunicaciones Rurales de la PUCP.

El proyecto 153-FINCYT consiste en el desarrollo de una solución tecnológica de bajo costo y rápido despliegue para la medición de contaminantes de aire en exteriores. Su implementación está compuesta de dos partes: la Red de Sensores Inalámbricos y el Sistema de Información. La red de sensores inalámbricos está compuesta por el Nodo Sensor (ver Figura 2) y las Puertas de Enlace (Gateway). La comunicación entre ellos es por medio inalámbrico utilizando el protocolo IEEE 802.15.4 en banda ISM. Por medio del Sistema de Información se podrá acceder a las mediciones realizadas por los nodos sensores y a la vez estudiar el cambio y evolución de los contaminantes en el tiempo en un área exterior de interés.

En el proyecto 153-FINCYT se ha implementado un piloto de sistema de medición de contaminantes de aire, ubicado en el campus de la Universidad y se ha logrado desplegar dos subredes. La primera con tres nodos paralelos a la Av. Universitaria y la segunda con tres nodos sensores alrededor de la Av. Riva Agüero. Cada subred cuenta con una Puerta de Enlace (Gateway) WiFi para que reenvíe las mediciones hechas por los nodos al Sistema de Información (ver Figura 1). Se ha mostrado las mediciones hechas por los nodos sensores de la Av. Universitaria a un experto del SENAMHI¹ y éste mostró que los registros de PM10², PM2.5³, CO⁴, H2S⁵ y NO2⁶ son valores razonables para la ubicación; pero las mediciones de SO2⁷ y O3⁸ necesitan ser ajustadas.

¹ SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

² Micro partícula atmosférica de diámetro aerodinámico menor de 10 micrómetros

³ Micro partícula atmosférica de diámetro aerodinámico menor de 2.5 micrómetros

⁴ Monóxido de Carbono

⁵ Sulfuro de Hidrógeno

⁶ Dióxido de Nitrógeno

⁷ Dióxido de Azufre

⁸ Ozono

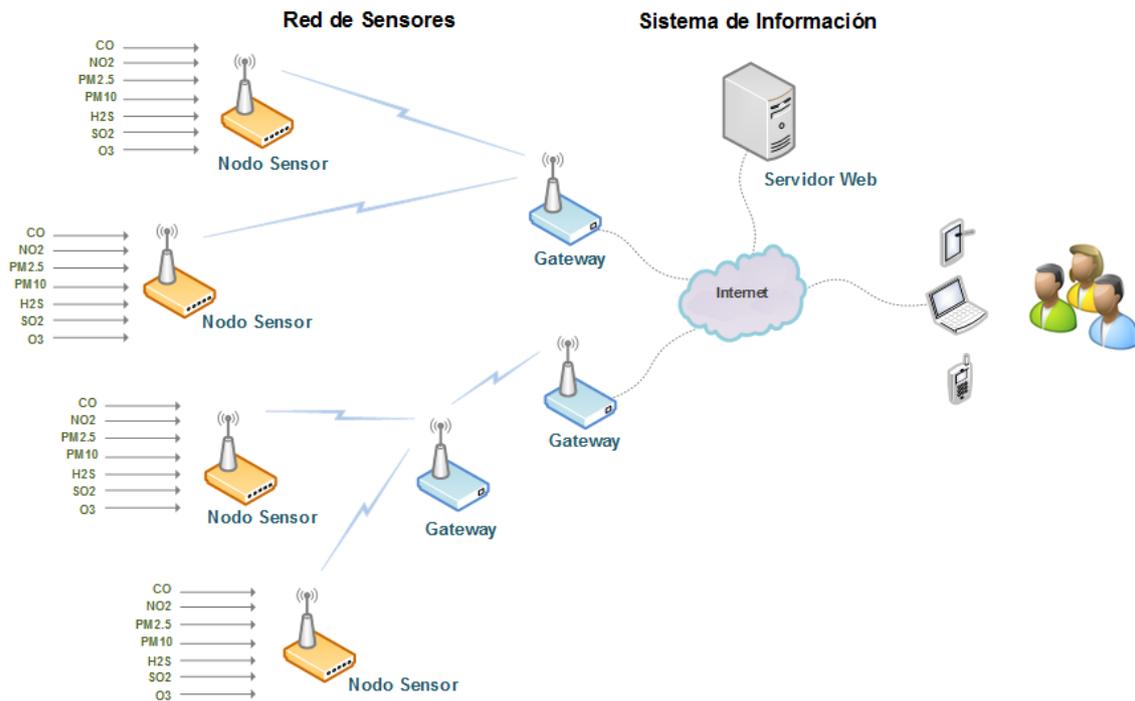


Figura 1: Esquema de la red de sensores inalámbricos y el sistema de información de Proyecto 153-FINCYT.

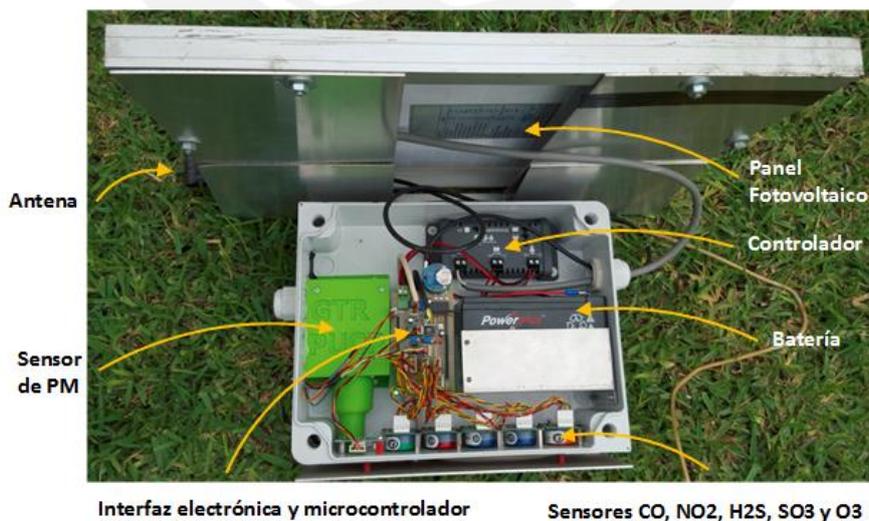


Figura 2: Nodo sensor del Proyecto 153-FINCYT. Fuente: Proyecto 153-FINCYT



(a) Vista inferior



(b) Vista panorámica

Figura 3: Nodo sensor instalado y Puerta de Enlace (Gateway) del Proyecto 153-FINCYT. Fuente: Proyecto 153-FINCYT

Este proyecto está pensado para brindar servicios en ambientes urbanos externos y hace uso de la tecnología IEEE 802.5.4 para la interconexión de nodo sensores con una puerta de enlace (Gateway - ver Figura 3 (b)). Es una alternativa que un grupo de nodos sensores se conecten a una puerta de enlace utilizando el estándar IEEE802.15.4 y la puerta de enlace sería el único nodo conectado a un servicio contratado (operador de servicios de telecomunicaciones) para reenviar las mediciones del grupo de sensores al servidor.

Como la red de sensores usa IEEE 802.15.4 en la banda ISM y será desplegada en zonas externas dentro de la ciudad, se tiene un problema: los efectos negativos sobre la red de sensores de la contaminación de radiofrecuencia en esta banda. Entonces la tesis se encargará de analizar y brindar recomendaciones por medio de una metodología para el despliegue de redes de sensores inalámbricas que usan la banda ISM en zonas externas en la ciudad.

Se plantea la realización de mediciones de interferencia electromagnética en una zona exterior urbana, obtener una potencia promedio y sobre ella proponer una cantidad de potencia en dB de respaldo; esto permitirá mejorar el diseño y el despliegue de una red inalámbrica IEEE 802.15.4 de sensores en la banda ISM para su correcto funcionamiento.

El objetivo de la tesis es implementar una metodología que permita dar recomendaciones para diseñar, implementar, probar y desplegar redes de sensores urbanos externos.

Para desarrollar la tesis se plantea la siguiente secuencia:

- Análisis teórico de la interferencia electromagnética.
- Análisis de:
 - Wireless Sensor Network – WSN
 - Bandas Industrial, Científica y Médica (ISM) 2.4 GHz y 900 MHz
 - Estándar IEEE 802.15.4
- Se realizará pruebas en laboratorio sobre los efectos de la interferencia en los nodos sensores y la puerta de enlace. Para la prueba, la red de sensores contará con nodos sensores y un Gateway que se comunicará mediante el estándar IEEE 802.15.4 en la banda no licenciada ISM 2.4 GHz.
- Se analizará la interferencia de un escenario urbano externo. Se harán las mediciones de variables que van a interferir en la comunicación de una red de sensores inalámbricos.
- Se implementará la metodología para generalizar las recomendaciones para la implementación de este tipo de redes que sufrirán por causa de la interferencia radio-electromagnética en ambientes urbanos externos.

2. Análisis del problema.

2.1 Antecedentes

En los últimos años, las tecnologías de redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks - WSN) se han convertido en un gran campo de interés de estudio para las universidades y las empresas; este tipo de redes proporciona la posibilidad de crear distintas aplicaciones en diversos ámbitos para servir a las personas [1].

En este trabajo se estudiará el despliegue de la red de sensores que realiza la medición de contaminantes de aire. Las WSN deben garantizar la calidad de servicio como cualquier otra red inalámbrica. Por ello, una red debe ser capaz de mantener servicios tales como recopilación de datos y de detección de eventos, incluso durante las pérdidas de enlace, debido a razones que incluyen ataques de interferencias o desvanecimiento de la señal [2].

Rondini *et al.* [3] presentan un análisis de interferencia en redes de sensores para ambientes internos, como oficinas en edificios, etc. Plantean que la red de sensores, en un ambiente con interferencia, sufre efectos sobre su capacidad de transferencia de datos y plantean una solución que combina software, distribución de los nodos y disponibilidad acumulada de la potencia de cómputo (*computational grids*) de cada nodo para compensar, al menos en parte el efecto negativo.

Yeh *et al.* [4] plantean una modificación a la capa MAC para poder disminuir los efectos de la interferencia provocados por equipos vecinos de este mismo tipo.

Liang y Zhao [5] así como Xu *et al.* [6] analizan el uso de radios cognitivas para la implementación de WSN. Estas radios tienen la capacidad de analizar el espectro en búsqueda de espectro libre de interferencia antes de transmitir.

Guo, Healy y Zhou [7] estudian los efectos de la interferencia de la banda 2.4GHz en redes IEEE 802.15.4 y los resultados muestran que los efectos de redes IEEE 802.11 y

hornos de microondas afectan hasta unos 25% de error en la transmisión de paquetes (packet error rate - PER) dependiendo de la distancia entre transmisor y receptor; pero estos estudios son realizados en ambientes internos.

De las investigaciones analizadas se deduce que existen efectos de pérdida de calidad de en la transmisión de datos en las redes inalámbricas de sensores que usan bandas ISM en un ambiente donde cohabitan otras tecnologías que también hacen uso de la banda ISM. Entonces en este trabajo se pretende hacer un estudio práctico para poder implementar una red de sensores inalámbricos en ambientes externos.

2.2 Escenario de despliegue de la red de sensores 153-FINCYT.

La red de sensores inalámbricos está diseñada para ser desplegada en ambientes externos utilizando la banda ISM. Por ejemplo, la instalación puede ser hecha a lo largo de una avenida, jirón o calle, con el objetivo de realizar mediciones de contaminantes. En la Figura 4 se muestra un esquema de la distribución de los nodos sensores en la Av. Abancay. Se observan 7 nodos sensores distribuidos en cada cuadra y dos Puertas de Enlace (Gateway). En este escenario surgen algunos problemas antes de realizar el despliegue causado principalmente por la interferencia de otras redes inalámbricas presentes en las calles circundantes que también usan la banda ISM.

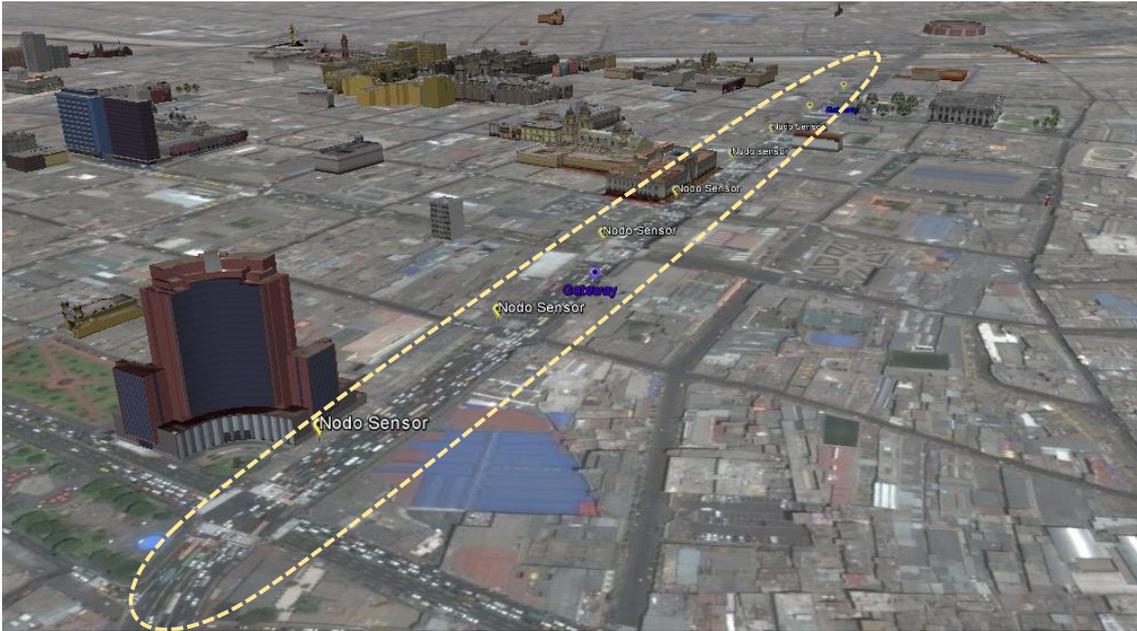


Figura 4: Esquema de la distribución de nodos sensores y puertas de enlace en la Av. Abancay. Fuente: Proyecto 153-FINCYT

2.3 Efectos de la interferencia.

La interferencia afectará principalmente los siguientes parámetros de diseño de la red:

- Altura de ubicación de los nodos sensores: Inicialmente debe estar alrededor de los 3m, según planteado por el proyecto 153-FINCYT, pero puede variar si es que en el lugar designado existe interferencia.
- Cobertura: La distancia entre el nodo y la Puerta de Enlace (Gateway) obtenido en el diseño del enlace inalámbrico. Es decir, para un tráfico requerido se seleccionará la potencia de transmisión, antena y frecuencia y la sensibilidad de recepción de la señal, y se obtendrá la cobertura. Por lo tanto, esta cobertura dependerá de la interferencia existente en la zona y ello está relacionado con ubicar más cerca o lejos la Puerta de Enlace.

3. Análisis de la tecnología y estándares

3.1 Bandas ISM.

Las bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) o bandas ICM (Industrial, Científico y Médico) son bandas para uso sin licencia del espectro radioeléctrico en aplicaciones de tipo industrial, científico y médico pero no para telecomunicaciones. Según el documento regulatorio *ITU Radio Regulation 5.150* las bandas ISM para la Región 2 son: 902-928 MHz (frecuencia central de 915 MHz), 2400-2500 MHz (frecuencia central de 2450 MHz), 5725-5875 MHz (frecuencia central de 5800 MHz), y 24-24.25 GHz (frecuencia central de 24.125 GHz) [12].

En el Perú se autoriza el uso de las bandas ISM para telecomunicaciones siempre y cuando se acepte la interferencia perjudicial de las aplicaciones industriales, científicas y médicas que operan en las bandas atribuidas para tales aplicaciones por el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias. En ningún caso podrán causar interferencia a las aplicaciones ISM [11].

En el Perú, la administración del espectro radioeléctrico la ejerce el Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Dicha entidad ha emitido la Resolución Ministerial N° 199-2013-MTC/03 que modifica las “Condiciones de operación de los servicios cuyos equipos utilizan las bandas 915-928 MHz, 916-928 MHz, 2400-2483.5 MHz, 5150-5250 MHz, 5250-5350 MHz, 5470-5725 MHz y 5725-5850 MHz”. Esta Resolución Ministerial especifica los parámetros máximos a tener en cuenta en la instalación de equipos en las frecuencias mencionadas. Los parámetros normados son: Potencia de salida del transmisor (en W, mW y dBm), la Ganancia máxima de la antena (en dBi) y la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima (en dBm) [11]. Además, esta norma precisa que no es necesario contar con asignación de espectro radioeléctrico, autorización, permiso o licencia para operar equipos utilizando la banda 916-928 MHz siempre que transmitan con una potencia no superior a cuatro vatios (4 W) o 36 dBm en antena

(potencia efectiva irradiada), en espacio abierto, orientados a aplicaciones punto-multipunto o de distancias mayores a 1km, y en este caso no aplica como opción para esta tesis. También se puede operar equipos utilizando la banda 915-928 MHz que transmitan con una potencia no superior a un vatio (1 W) 30 dBm en antena (potencia efectiva irradiada) [11], el cual podría utilizarse para zonas urbanas. Estos parámetros deben considerarse al momento de implementar la metodología. Ver Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros máximos a tener en cuenta para la instalación de dispositivos inalámbricos [11].

Banda de Frecuencias (MHz)	Potencia de Salida del transmisor			Ganancia máxima de la antena dBi	PIRE máxima (dBm)
	(W)	(mW)	(dBm)		
2400 – 2483.5	0.5	500	27	9	36
916- 928	1	1000	30	6	36

3.2 Redes de Sensores Inalámbricos.

Las redes de sensores inalámbricos o Wireless Sensor Networks (WSN) son elementos que actualmente conocemos como la evolución de las redes o las redes de la siguiente generación (*next generation networks*). Según UIT-T [10], las WSN son parte no sólo de una evolución tecnológica sino de una evolución de los servicios de información y comunicaciones orientado a las múltiples y específicas necesidades de información individuales en una sociedad global e intercomunicada. Ello supone la presencia de un elemento nuevo en la infraestructura de información y comunicaciones: los “servicios de apoyo a las decisiones individualizadas” o “*individualized decision support services*”.

Una red de sensores inalámbricos es una red que comprende nodos sensores interconectados intercambiando datos sensados vía comunicación cableada o inalámbrica.

Las características de los nodos sensores inalámbricos son: eficiencia en el uso de energía, bajo consumo de energía, tamaño pequeño y compacto, distancias cortas de comunicación, elementos de sensado, transmisor de baja potencia, interactivo, programable, autónomo, larga supervivencia, bajo costo, restringidos en cómputo, comunicación, almacenamiento y energía. [10].

3.2.1 Componentes de las Redes de Sensores Inalámbricos

Según ITU-T [13], se tienen las siguientes definiciones:

Sensor: Equipo electrónico que sensa una condición física o componente químico y entrega una señal electrónica proporcional a la característica observada.

Nodo sensor: Un equipo consistente de un sensor o sensores y actuador/es opcional/les con capacidad de procesamiento de datos y conexión a red. Un nodo sensor representa a un gran número de nodos del mismo tipo, los cuales están distribuidos y cooperantes uno con otro. Cada nodo tiene un elemento sensor, un microprocesador o microcontrolador, el cual procesa la señal obtenida por el sensor, un transceptor (transmisor/receptor) y una fuente de energía [10] (ver Figura 5).

Componentes de un nodo sensor: Transceptor (transmisor/receptor), microcontrolador, elemento sensitivo, fuente de energía (ver Figura 5).

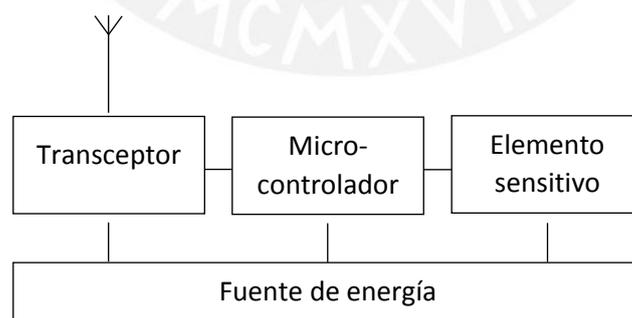


Figura 5: Estructura interna de un nodo sensor [10]

Como regla el nodo sensor debe tener bajo consumo de energía, por lo tanto el transceptor también. La distribución de los nodos debe ser de tal manera que se cumpla con dicha

regla y que la transmisión se garantice. Para ello la distancia entre los nodos sensores debe oscilar en el rango de decenas de metros (20 a 50 metros) [10].

Nodo Puerta de Enlace (Gateway): También llamado estación base. Es un punto de colección de datos de los nodos sensores y el que envía dichos datos al sistema de gestión o monitoreo de la red de sensores inalámbricos.

3.2.2 Aplicaciones en Redes de Sensores Inalámbricos:

Se conoce así al monitoreo y colección de datos de un número de nodos sensor distribuidos espacialmente en un objeto abierto o cerrado.

Algunas aplicaciones específicas [10]:

- Seguimiento y vigilancia a objetivo militar
- Detección oportuna de posible falla de mecanismo, cuando se monitorea parámetros como vibración, temperatura, presión, etc
- Control de acceso a objeto remoto en tiempo real.
- Control de condición de edificaciones o construcciones.
- Casa inteligente.
- Ahorro de energía y recursos.
- Monitoreo de la salud biomédica.
- Control ambiental de parámetros ecológicos.
- Monitoreo de recuperación de desastres naturales.
- Exploración de ambientes peligrosos y sentido sísmico.

3.2.3 Directivas para implementar Redes de Sensores Inalámbricos:

Las siguientes son directivas de ingeniería, descritas por ITU-T [10], que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar redes de sensores inalámbricos:

- “Desarrollo de elementos de sensado baratos, de bajo consumo de energía, bajo nivel de ruido, tamaño pequeño.
- Integración de circuitos de sensores y procesamiento de señal.
- Integración de sensores en arreglos de sensores para reducir el ruido inherente.
- Desarrollo de nodo sensor capaz de procesar señales y que tiene interfaces de radio comunicaciones diferentes.
- Integrando la redes WSN en los sistemas de información a fin de proveer nuevos servicios.
- Desarrollo de nuevos protocolos de comunicación que mejoran la confiabilidad y sostenibilidad ante interferencias, algoritmos para procesamiento de datos distribuidos, algoritmos de sincronización, métodos de posicionamiento espacial de nodos, algoritmos de intercambio de datos energéticamente efectivos en la red.”

3.2.4 Otros “retos” técnicos a afrontar en el diseño de Redes de Sensores Inalámbricos:

Las siguientes son otras recomendaciones de ITU-T [10] que deben ser tomadas en consideración cuando se implementen redes de sensores inalámbricos:

- “La distancia entre nodos cercanos no debe exceder cierto valor.”
- “Operación sin intervención humana utilizando componentes de hardware confiables, protocolos resistentes a errores y ruido, auto configuración en caso de cambios.”
- “Autonomía energética” y uso de técnicas de eficiencia energética. Por ejemplo la evaluación del tiempo en modo “dormido” del nodo sensor, cantidad de veces en que debe “despertarse” para sensar y transmitir.
- “Confiabilidad” de la WSN, se mantiene la integridad de la red cuando se pierde repentinamente la conexión entre algunos nodos sensores.
- “Confiabilidad” en la transmisión a través de enlaces inalámbricos robustos utilizando radiocomunicación multicanal y de espectro ensanchado.

- “Flexibilidad” para cambios de parámetros de operación. Ejemplo: Frecuencia de sensado.
- “Seguridad de la información” transmitida y la información almacenada en la memoria local del nodo sensor.
- Monitoreo de las condiciones del sistema: componentes físicos, energía, parámetros de las comunicaciones, entre otros.

3.2.5 Criterios para toma de decisiones y evaluación de la eficiencia en Redes de Sensores Inalámbricos

ITU-T [10], presenta los criterios de evaluación de la eficiencia de las redes de sensores inalámbricos.

Dichos criterios servirán de marco para evaluación de la metodología a implementar. A continuación se muestra un resumen de los mismos:

“Criterio de la Eficiencia

El tiempo de vida depende mucho del consumo, recarga de energía y tiempo de vida de la batería. Y el consumo de energía depende del protocolo usado, de los valores en los parámetros de comunicación, el tiempo de operación y el estado inactivo o *idle*, el número de retransmisiones, adquisición de valores de sensores y procesamiento de datos.”

“Criterio del Procesamiento de Datos

Son dos los procesos de datos en un nodo sensor: almacenamiento y recuperación para transmisión.

La eficiencia está relacionada con el modo de interacción con la red WSN, es decir la cantidad de veces que envía mensajes a la red y los subprocesos para el manejo eficiente de los datos: indexación, lectura, escritura y encriptación.”

“Criterio de la Transferencia de Datos

Transmisión de mensajes en tiempos estándares a una distancia promedio medidos previamente o tomados de otras implementaciones.”

“Criterio de la Calidad de Servicio

Se determinan y definen valores para los siguientes parámetros: rendimiento (*throughput*) de datos, el nivel de pérdida de bits y paquetes, las tasas de confiabilidad y disponibilidad y la fluctuación (*jitter*).

Otros elementos para el análisis son el nivel de señal, la distancia entre diferentes nodos sensores, el nivel de batería, etc.”

3.3 Estándar IEEE 802.15.4.

A inicios de los años 2000 el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*) liberó la primera versión del estándar IEEE 802.15.4 “Low-Rate Wireless Personal Area Networks” o “Redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos” desarrollado especialmente para equipos de bajo consumo de energía. Este estándar regula la construcción de protocolos del nodo sensor de bajo nivel, es decir de la capa física y de la capa de control de acceso al medio (MAC) [10]

La creación del estándar IEEE 802.15.4 provocó el desarrollo de nuevos estándares que lo usan como protocolo de bajo nivel, entre ellos ZigBee, WirelessHART y 6LoWPAN (IPv6 sobre Low Power Wireless Personal Area Networks) y cada uno de ellos ofrece su propia solución de WSN [10].

Las redes de área personal (PAN) son redes de alcance corto, concebidas inicialmente para el rango de alcance de una persona, aproximadamente 10 metros. A la fecha (abril 2017), el rango de alcance es de 100 metros, aproximadamente, con línea de vista.

Las redes inalámbricas de área personal (WPAN) son redes PAN que utilizan el medio inalámbrico para transmisión de datos.

En la Tabla 2 se muestra las categorías de redes inalámbricas de área personal (WPAN).

Tabla 2: Redes inalámbricas de área personal - WPAN

Categoría	Descripción
802.15.1	Bluetooth
802.15.3	Ultra-wideband (UWB)
802.15.6	Body area networks (BAN)
802.15.4	Low rate wireless personal area networks (LR-WPAN)

Las redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transmisión (LR-WPAN) son redes de bajo costo que permiten conectividad en aplicaciones que usan poco consumo de energía y tienen requerimientos mínimos de *throughput*, son de fácil instalación, transferencia de datos confiable, operación de alcance corto, muy bajo costo, bajo mantenimiento y un protocolo simple y flexible [14].

Principales características de una LR-WPAN [14]:

- Tasas de transferencia OTA de 250, 100, 40 y 20 kbps
- Direcciones de 16 bits o 64 bits
- Canal de acceso CSMA-CA
- Confiabilidad de transferencia por uso de protocolo con confirmación de entrega de mensajes.
- Consumo bajo de energía
- Detección de energía (ED)
- Indicador de calidad de enlace (LQI)
- 16 canales en la banda de 2450 MHz, 30 canales en la banda 915 MHz y 3 canales en la banda de 868 MHz.

En la Tabla 3 se muestran las subcategorías del estándar IEEE 802.15.4.

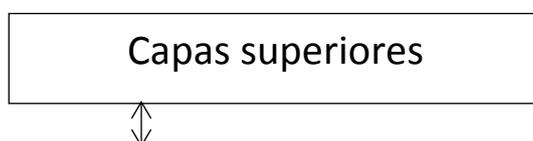
Tabla 3: Sub-categorías de redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transmisión (LR-WPAN)

Categoría	Descripción
802.15.4a/b	Estándar básico

Categoría	Descripción
802.15.4c	Para China
802.15.4d	Para Japón
802.15.4e	Para aplicaciones industriales
802.15.4f	Para identificación active por radiofrecuencia (RFID)
802.15.4g	Para redes inteligentes (smart utility networks - SUN)

3.3.1 Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4:

Basada en las capas OSI (*Open System Interconnection* – interconexión de sistemas abiertos) una LR-WPAN solo considera dos capas: Física (PHY) y MAC (*medium access control*). La capa física contiene el transceptor de radio-frecuencia (RF) y sus mecanismos de control de bajo nivel y la capa MAC provee acceso a la capa física. La Figura 6 muestra la representación gráfica de las capas de la arquitectura y la interrelación entre capas.



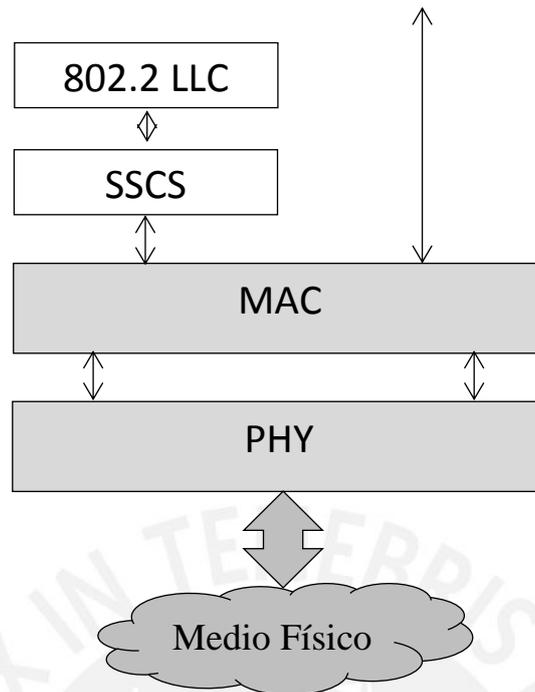


Figura 6: Arquitectura del estándar IEEE 802.15.4 (LR-WPAN) [14]

3.3.2 La capa física (PHY):

La capa física (PHY) provee dos servicios: servicio de datos y servicio de interface a PLME-SAP (*physical layer management entity-service access point*). El servicio de datos de la capa física PHY habilita la transmisión y recepción de las unidades de datos del protocolo PHY a través del canal de radio.

Las características de la capa física PHY son:

- Activación, desactivación del transceptor de radio
- Detección de energía (ED)
- Indicación de calidad de enlace (LQI – *link quality indicator*)
- Selección de canal (*channel selection*)
- Evaluación de canal libre (CCA – *clear channel assessment*)
- Transmitir y recibir paquetes a través del medio físico

La radio opera en una o más bandas no licenciadas:

- 868 -868.6 MHz (Europa)
- 902 – 928 MHz (Región 2 que incluye Sudamérica) [17]

- 2400 – 2483.5 MHz (en todo el mundo)

En el Perú están disponibles las bandas no licenciadas [11]:

- 915 – 928 MHz
- 916 – 928 MHz
- 2400 – 2483.5 MHz
- 5150 – 5250 MHz
- 5250 – 5350 MHz
- 5470 – 5725 MHz
- 5725 – 5850 MHz

La distribución de frecuencias, modulación y tasa de trasmisión estándares se muestra en la tabla 4, sin embargo, para el Perú, de acuerdo a la RM N° 199-2013-MTC/03 [11], es necesario modificar el rango de la frecuencia de 902-928 MHz a 915-928/916-928 MHz. En la Tabla 5 se muestra este ajuste obligado. Además dicha resolución precisa que las bandas no licenciadas a 915-928/916-928 MHz se utilizarán bajo determinadas restricciones y condiciones de uso y permitiendo el ingreso al país de equipos y aparatos de telecomunicaciones que a través de técnicas de configuración, puedan restringir su operación a dichas bandas.

Tabla 4: Sub-categorías de redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transmisión [14]

Rango de frecuencia de operación (MHz)	Extensión-spreading		Parámetros de datos		
	Chip rate (kchips/s)	Modulación	Bit rate (Kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Símbolos
868 – 868.6	300	BPSK	20	20	Binario
902 – 928	600	BPSK	40	40	Binario
2400 – 2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

Tabla 5: Sub-categorías de redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transmisión - Perú

Rango de frecuencia de operación (MHz)	Extensión-spreading		Parámetros de datos		
	Chip rate (kchips/s)	Modulación	Bit rate (Kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Símbolos
868 – 868.6	300	BPSK	20	20	Binario
915 – 928 916 - 928	600	BPSK	40	40	Binario
2400 – 2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

La capa de acceso al medio (MAC):

La capa de acceso al medio provee dos servicios: servicio de datos de la MAC e interface a la gestión de servicio de la MAC a la MLME-SAP (MAC *sublayer management entity service access point*). El servicio de datos de la MAC habilita la transmisión y recepción de unidades de datos del protocolo MAC a través del servicio de datos de la capa física PHY.

Las características de la capa de acceso al medio son:

- Gestión de faros
- Acceso a canal
- Gestión de GTS (*guaranteed time slot*)
- Validación de tramas
- Entrega de tramas con confirmación de entrega
- Asociación y des-asociación
- Capacidad de implementación de mecanismos de seguridad

3.3.3 Distribución de canales para el estándar IEEE 802.15.4:

El estándar 802.15.4 define un total de 27 canales numerados de 0 a 26 distribuidos en tres bandas de frecuencias. Dieciséis (16) canales para la banda de 2450 MHz, diez (10) canales para la banda de 915 MHz y un (01) canal para la banda 868 MHz [14].

El centro de los canales es definido como sigue:

$$F_c = 868.3 \text{ MHz, para } k = 0$$

$$F_c = 906 + 2 (k-1) \text{ MHz, para } k = 1, 2, \dots, 10$$

$$F_c = 2405 + 5 (k-11) \text{ MHz, para } k = 11, 12, \dots, 26$$

Donde k es el número de canal.

La tabla 6, muestra los centros de los canales para las bandas 868, 915 y 2450 MHz.

Tabla 6: Centros de los canales para las bandas 868, 915 y 2450 MHz

Canal	Canal (Hex)	Centro de Canal (MHz)
Banda 868 MHz		
0	0	863.3
Banda 915 MHz		
1	1	906
2	2	908
3	3	910
4	4	912
5	5	914
6	6	916
7	7	918
8	8	920
9	9	922
10	A	924
Banda 2450 MHz		
11	B	2405
12	C	2410
13	D	2415
14	E	2420
15	F	2425
16	10	2430

Canal	Canal (Hex)	Centro de Canal (MHz)
17	11	2435
18	12	2440
19	13	2445
20	14	2450
21	15	2455
22	16	2460
23	17	2465
24	18	2470
25	19	2475
26	1A	2480

Dado que en el Perú sólo están disponibles los rangos de frecuencias 915 a 928 MHz y 916 a 928 MHz [4], no se pueden utilizar los canales 1, 2, 3, 4 y 5 de la banda 915 MHz (sombreados en la Tabla 6) del protocolo 802.15.4.

3.4 Estándares que operan en la banda de 2400 MHz.

Las siguientes tecnologías son las más comunes en la banda de 2.4GHz.

- IEEE 802.11g
- IEEE 802.11n en 2.4 GHz
- IEEE 802.15.1 (FHSS) Bluetooth

3.4.1 IEEE 802.11g:

El protocolo IEEE 802.11g que implementa una red LAN inalámbrica opera en canales desde 2.402 GHz hasta 2.494 GHz y tiene 14 canales de 20 MHz. La Tabla 7 muestra el centro de cada canal donde opera este protocolo [18]. Sin embargo en el Perú sólo se utilizan el rango de canales del 1 al 11 por pertenecer a la Región 2 junto con Estados Unidos de Norteamérica [17].

En escenarios donde existan múltiples celdas 802.11g, operando en canales sobrepuestos o adyacentes, no existirá interferencia si la distancia entre las frecuencias de centro de

canal es al menos 25 MHz [26], dichos canales son el 1, 6 y 11, en la Figura 7 se visualiza dicha separación de canales sin interferencia.

Tabla 7: Listado de canales de operación de IEEE 802.11gn [18]

Canal	Frecuencia de Centro de Canal	Frecuencia inicial	Frecuencia final	Dominios
1	2412	2402	2422	FCC, IC, ETSI, China
2	2417	2407	2427	FCC, IC, ETSI, China
3	2422	2412	2432	FCC, IC, ETSI, China
4	2427	2417	2437	FCC, IC, ETSI, China
5	2432	2422	2442	FCC, IC, ETSI, China
6	2437	2427	2447	FCC, IC, ETSI, China
7	2442	2432	2452	FCC, IC, ETSI, China
8	2447	2437	2457	FCC, IC, ETSI, China
9	2452	2442	2462	FCC, IC, ETSI, China
10	2457	2447	2467	FCC, IC, ETSI, España, Francia, China
11	2462	2452	2472	FCC, IC, ETSI, España, Francia, China
12	2467	2457	2477	ETSI, China, Francia
13	2472	2462	2482	ETSI, China, Francia
14	2484	2474	2494	Japón

3.4.2 IEEE 802.11n en 2.4 GHz:

La adenda IEEE 802.11n adiciona cambios y nuevas características al estándar IEEE 802.11 para mejorar el throughput [27] en las bandas de 2.4 GHz y 5GHz. Implementa MIMO (Multiple Input, Multiple Output), cuando sea necesario adiciona un canal secundario de 20 MHz al canal principal de 20 MHz y hace posible el uso canales de operación de 40 MHz. Los canales principales que se utilizan son los mismos descritos en la tabla 7 y los canales “ampliados” a 40 MHz es la suma de dos canales adyacentes, uno principal y otro secundario iniciando el canal principal en el canal 1.

3.4.3 IEEE 802.15.1 (FHSS) Bluetooth:

El protocolo IEEE 802.15.1 que implementa una PAN inalámbrica opera en canales ISM. El rango de operación de sus frecuencias va desde 2401.5 MHz hasta 2480.5 MHz. Tiene 79 canales de 1 MHz cada uno. Estos canales traslapan totalmente a los canales del protocolo IEEE 802.15.4. La tabla 8 muestra el centro y extremos de cada canal donde opera el protocolo IEEE 802.15.1 [20].

Tabla 8: Listado de canales de operación de IEEE 802.15.1 [20]

Canal	Centro	Inicio	Fin	Canal	Centro	Inicio	Fin	Canal	Centro	Inicio	Fin
0	2402	2401.5	2402.5	27	2429	2428.5	2429.5	54	2456	2455.5	2456.5
1	2403	2402.5	2403.5	28	2430	2429.5	2430.5	55	2457	2456.5	2457.5
2	2404	2403.5	2404.5	29	2431	2430.5	2431.5	56	2458	2457.5	2458.5
3	2405	2404.5	2405.5	30	2432	2431.5	2432.5	57	2459	2458.5	2459.5
4	2406	2405.5	2406.5	31	2433	2432.5	2433.5	58	2460	2459.5	2460.5
5	2407	2406.5	2407.5	32	2434	2433.5	2434.5	59	2461	2460.5	2461.5
6	2408	2407.5	2408.5	33	2435	2434.5	2435.5	60	2462	2461.5	2462.5
7	2409	2408.5	2409.5	34	2436	2435.5	2436.5	61	2463	2462.5	2463.5
8	2410	2409.5	2410.5	35	2437	2436.5	2437.5	62	2464	2463.5	2464.5
9	2411	2410.5	2411.5	36	2438	2437.5	2438.5	63	2465	2464.5	2465.5
10	2412	2411.5	2412.5	37	2439	2438.5	2439.5	64	2466	2465.5	2466.5
11	2413	2412.5	2413.5	38	2440	2439.5	2440.5	65	2467	2466.5	2467.5
12	2414	2413.5	2414.5	39	2441	2440.5	2441.5	66	2468	2467.5	2468.5
13	2415	2414.5	2415.5	40	2442	2441.5	2442.5	67	2469	2468.5	2469.5
14	2416	2415.5	2416.5	41	2443	2442.5	2443.5	68	2470	2469.5	2470.5
15	2417	2416.5	2417.5	42	2444	2443.5	2444.5	69	2471	2470.5	2471.5
16	2418	2417.5	2418.5	43	2445	2444.5	2445.5	70	2472	2471.5	2472.5
17	2419	2418.5	2419.5	44	2446	2445.5	2446.5	71	2473	2472.5	2473.5
18	2420	2419.5	2420.5	45	2447	2446.5	2447.5	72	2474	2473.5	2474.5
19	2421	2420.5	2421.5	46	2448	2447.5	2448.5	73	2475	2474.5	2475.5
20	2422	2421.5	2422.5	47	2449	2448.5	2449.5	74	2476	2475.5	2476.5
21	2423	2422.5	2423.5	48	2450	2449.5	2450.5	75	2477	2476.5	2477.5
22	2424	2423.5	2424.5	49	2451	2450.5	2451.5	76	2478	2477.5	2478.5
23	2425	2424.5	2425.5	50	2452	2451.5	2452.5	77	2479	2478.5	2479.5
24	2426	2425.5	2426.5	51	2453	2452.5	2453.5	78	2480	2479.5	2480.5
25	2427	2426.5	2427.5	52	2454	2453.5	2454.5				
26	2428	2427.5	2428.5	53	2455	2454.5	2455.5				



4. Análisis de los efectos de la interferencia IEEE 802.11 sobre enlaces IEEE 802.15.4.

4.1 Análisis de la interferencia de la tecnología IEEE 802.11 (WiFi) sobre la tecnología IEEE 802.15.4 en 2.4GHz.

Los equipos que utilizan el protocolo 802.11g utilizan convenientemente los canales 1, 6 y 11, debido a que sus frecuencias de operación no se traslapan y así evitan la interferencia de frecuencia con equipos que utilizan los canales adyacentes (ver Figura 7). Dichos canales (1, 6 y 11) a su vez traslapan a los canales del protocolo IEEE 802.15.4. Así se tiene que el canal 1 del protocolo IEEE 802.11g traslapa a los canales 11, 12, 13 y 14 del protocolo IEEE 802.15.4, el canal 6 del protocolo IEEE 802.11gn traslapa a los canales 16, 17, 18 y 19 del protocolo IEEE 802.15.4 y el canal 11 del protocolo IEEE 802.11gn traslapa a los canales 21, 22, 23 y 24 del protocolo IEEE 802.15.4. Los canales 15 y 20 del protocolo IEEE 802.15.4 tienen mínima interferencia de los canales del protocolo IEEE 802.11g y los canales 25 y 26 del protocolo IEEE 802.15.4 no tienen ninguna interferencia de los canales del protocolo IEEE 802.11gn; esto considerando que en el Perú (como parte del Estados Unidos, Centro y Sudamérica [11]) sólo se utilizan los canales 1 al 11 del protocolo IEEE 802.11g. En la Figura 7 se muestra gráficamente esta interferencia.

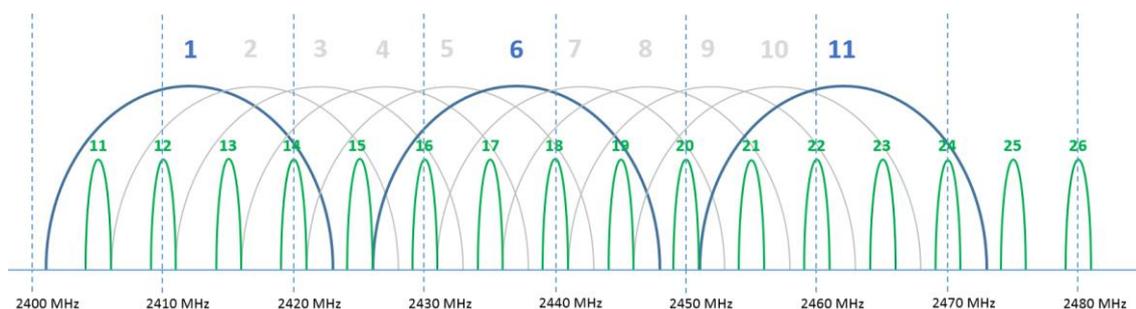


Figura 7: Traslape entre canales de protocolos IEEE 802.11gn y IEEE 802.15.4. Fuente: Elaboración propia.

Los equipos que utilizan el protocolo IEEE 802.11n utilizan los canales 1, 6 y 11, cuando solamente necesiten 20 MHz. En caso de necesitar mayor ancho de banda adicionan el canal adyacente de 20 MHz, de esta manera tendríamos las posibilidades de canales de 40 MHz mostrados en la Figura 8. De la Figura 8 podemos considerar un escenario con dos *Access Point* IEEE 802.11n, en el que el primer AP utiliza el canal “ensanchado” de 40 MHz número 3 y el segundo AP utiliza el canal “ensanchado” número 11. En el escenario descrito todos los canales del protocolo IEEE 802.15.4 (canales del 11 al 26), estarían bajo zona de interferencia y con altas probabilidades de pérdida de paquetes e incluso pérdida de conexión.

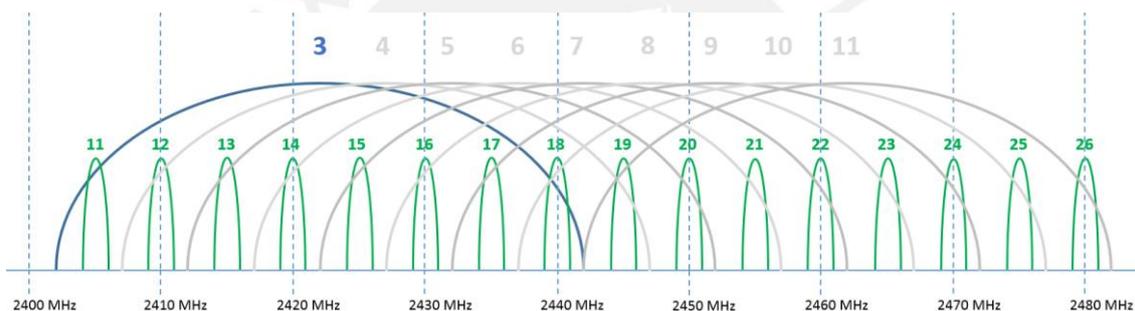


Figura 8: Traslape entre canales de protocolos IEEE 802.11n de 40 MHz e IEEE 802.15.4. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Análisis de la interferencia de la tecnología IEEE 802.15.1 (Bluetooth) sobre la tecnología IEEE 802.15.4 en 2.4GHz.

El protocolo IEEE 802.15.1 tiene 79 canales (numerados del 0 al 78) consecutivos y adyacentes de 1 MHz de ancho de canal.

Cada canal del protocolo IEEE 802.15.4 traslapa totalmente a un canal y parcialmente (a la mitad) a dos canales del protocolo IEEE 802.15.1. De esa manera, el canal 11 del protocolo IEEE 802.15.4 traslapa totalmente al canal 3 y parcialmente a los canales 2 y 4 del protocolo IEEE 802.15.1, el canal 12 del protocolo IEEE 802.15.4 traslapa totalmente al canal 8 y parcialmente a los canales 7 y 9 del protocolo IEEE 802.15.1, y así

sucesivamente hasta que el canal 25 del protocolo IEEE 802.15.4 traslapa totalmente el canal 73 y parcialmente a los canales 72 y 74 del protocolo IEEE 802.15.1 y el último canal (canal 26) del protocolo IEEE 802.15.4 traslapa totalmente al canal 78 y parcialmente al canal 77 del protocolo 802.15.1, además se observa que el protocolo 802.15.1 tiene 32 canales libres de interferencia de los canales del protocolo 802.15.4 (ver Figura 9).

Debido a que el protocolo IEEE 802.15.1 utiliza el mecanismo AFH (*Adaptive Frequency Hopping*) [20] mediante el cual selecciona un canal que no tenga interferencia de las frecuencias de otros canales de los protocolos 802.11 (WiFi), 802.15.4 y 802.15.3 (UWB), el uso de los canales de este protocolo (IEEE 802.15.1 – Bluetooth) no tendrá efecto sobre las frecuencias de los canales del protocolo IEEE 802.15.4.

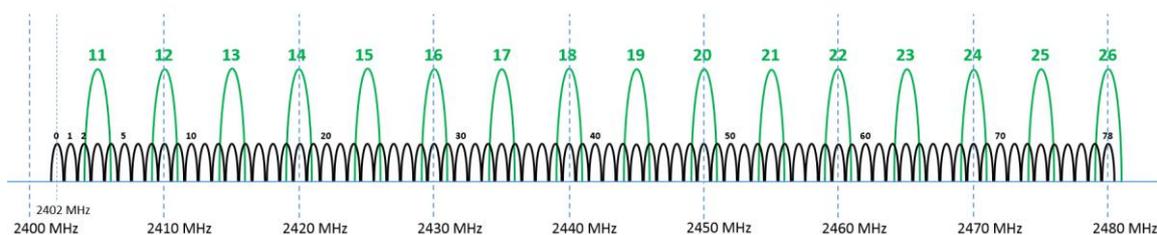


Figura 9: Traslape entre canales de protocolos IEEE 802.15.1 y IEEE 802.15.4. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Pruebas de cobertura de un enlace punto a punto IEEE 802.15.4.

En el proyecto 153-FINCYT se ha realizado un cálculo de la distancia máxima que se podría lograr. La prueba fue realizado en el campus de la PUCP, un ambiente con menos interferencia en 2.4GHz que en las calles, y se ha utilizado la radio X-Bee-PRO en 2.4GHz con una antena de 3dBi. Las especificaciones técnicas de la radio XBeePRO se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Características del X-Bee-PRO en la banda de 2.4GHz.

X-Bee-PRO 2.4GHz	
	
Fabricante	Digi
Dimensiones	2.2cm X 2.7 cm
Distancia adentro/urbano	90 m (300 pies)
Distancia afuera/línea de vista	3200 m (2 millas)
Sensibilidad de recepción	-102 dBm
Potencia de salida	63 mW (+18 dBm) versión USA
Velocidad de datos útiles	250 Kbps
Modulación	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Topologías	Punto-punto, punto-multipunto, igual-igual
Frecuencias de operación	2.4000 - 2.4835 GHz
Interfaz	3.3V CMOS UART, SPI, I2C, PWM, DIO, ADC
Consumo	792mW @ TX 223mW @ RX
Alimentación	2.7 - 3.6VDC

Para realizar las pruebas de distancia se tomaron distintos puntos estratégicos de la universidad en donde se tiene línea de vista. Se hicieron varias mediciones de este tipo, de la cual se obtuvo como conclusión que se puede lograr comunicación desde dos puntos extremos de la universidad solamente si existe línea de vista (la mayor distancia alcanzada fue de aproximadamente 700 metros) a una velocidad de transmisión de 54 kbps y que los nodos deberían estar ubicados en las partes altas. De esta manera se lograría una adecuada comunicación entre los nodos sensores y el Gateway, sin importar tanto la distancia ya que es posible entablar el enlace. En las pruebas realizadas se midió la Potencia de Transmisión y el Nivel de Sensibilidad de recepción, las cuales se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Pruebas de Nivel de Rx y de distancia.

Potencia de Tx	Ganancia de la antena	Nivel Rx	Distancia
+18 dBm	3 dBi	-86 dBm	750 m
+18 dBm	3 dBi	-81 dBm	500 m

Entonces en un ambiente exterior a baja distancia del suelo, de 3 a 5m se puede lograr un enlace de unos 700m, pero se necesita de línea de vista y se establece que el nivel de recepción mínimo para que exista transferencia de trama es de -85 dBm aproximadamente, usando una antena de 3 dBi a una velocidad de trasmisión de 54 kbps.

Por otro lado, se hicieron diversas pruebas sin que existiese línea de vista. A pesar de que la distancia no fue tan grande, no se podía establecer comunicación. Se hicieron pruebas entre el pabellón de Electrónica y el pabellón de Arquitectura y se comprobó que si no existiese línea de vista es poco probable que se pueda entablar comunicación. Entonces se puede concluir que la distancia no es un factor determinante para la comunicación si es que no existiese obstáculos en la línea de vista.

4.4 Análisis y observaciones de la interferencia de la tecnología IEEE802.11 (WiFi) sobre la tecnología IEEE802.15.4 en 2.4GHz en ambientes internos.

El escenario de la prueba es un ambiente de laboratorio con dos nodos transeptores Digi X-Bee S2C en la banda 2.4 GHz con una antena de 0dBi. Las pruebas fueron hechas en la oficina del GTR-PUCP, es decir en un ambiente interno. Se utilizó, además, un analizador de espectro a fin de observar gráficamente la energía de las ondas electromagnéticas en el espectro radioeléctrico en el laboratorio. Ver Figura 10.

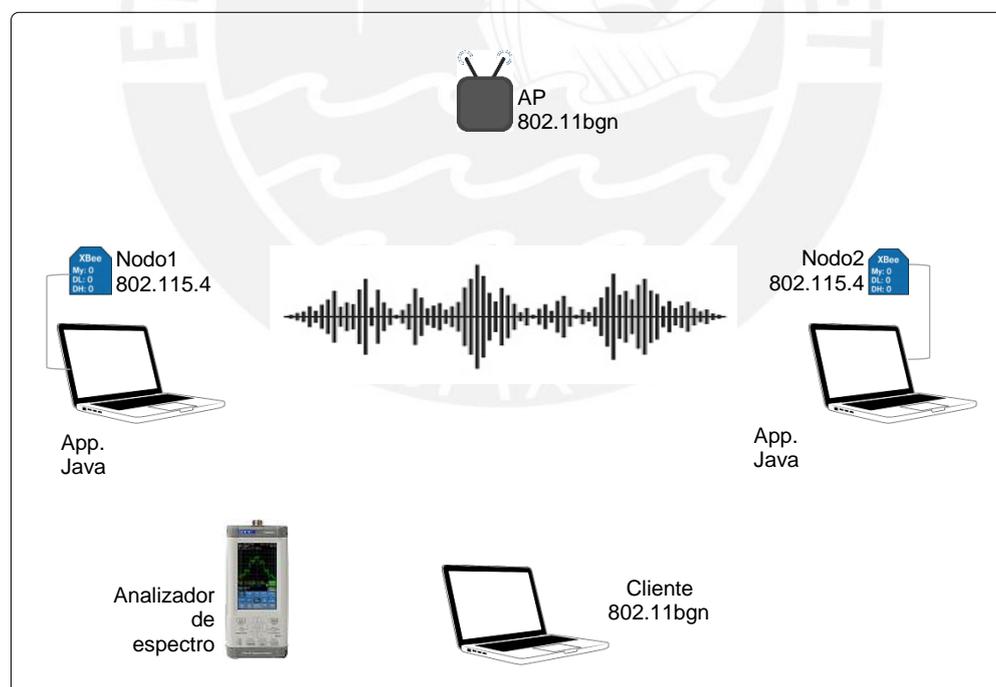


Figura 10: Escenario de prueba de interferencia IEEE 802.11bgn y IEEE 802.15.4.
Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 Mediciones de redes inalámbricas en ambientes internos.

Las pruebas fueron realizadas en la sede del GTR-PUCP, y en la Figura 11 se observa las redes inalámbricas en los canales 1, 6 y 9 del protocolo IEEE802.11. La captura se hizo con un dispositivo celular y se tomó como referencia para las dos pruebas de transmisión entre dos nodos 802.15.4. Una prueba se hizo fuera de las frecuencias de canales 802.11 y la otra prueba dentro de la frecuencia de un canal 802.11. La captura de la imagen en pantalla se muestra en la Figura 11.

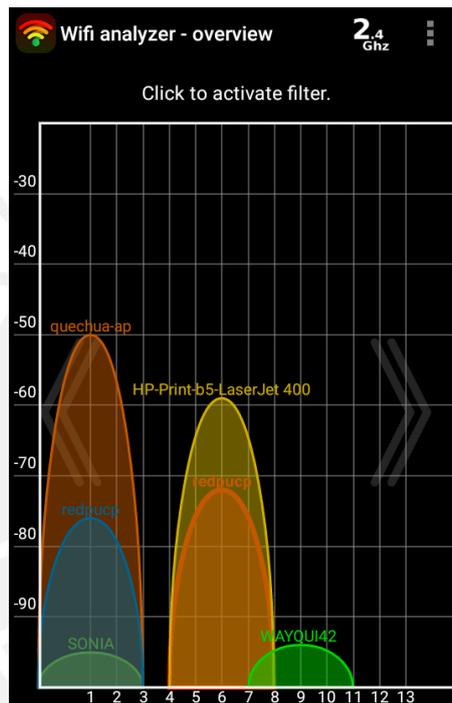


Figura 11: Intensidad de redes inalámbricas en la oficina del GTR-PUCP.

4.4.2 Pruebas de transferencia de tramas IEEE 802.15.4.

Seleccionando un canal del IEEE 802.15.4 sin interferencia con el IEEE 802.11gn:

Configuramos los transceptores XBee para transmitir/recibir datos en el canal 21 o 15 (2455 MHz ancho de canal de 5MHz) el cual no se tra slapa con el canal 6 del protocolo 802.11bgn.

Los dos nodos transceptores están separados por una distancia de 10 metros. Cada transceptor está conectado a una laptop por un puerto USB, se utiliza un driver conversor USB-Serial y cada laptop corre un programa en Java y tienen sincronizados la fecha y

hora del sistema. En la laptop con el nodo transmisor la aplicación Java toma la fecha y hora del sistema y la envía por el puerto serial al cual está conectado. En la laptop con el nodo receptor, la aplicación Java lee los datos recibidos por el puerto serial al cual está conectado, convierte los datos recibidos a fecha y hora, toma la fecha y hora del sistema y obtiene el tiempo de demora de la transmisión. El tamaño del paquete de datos es de 808 bytes y se transmitió un paquete cada segundo (01s) entre el aplicativo java de transmisión y el de recepción.

Los resultados obtenidos son transmisión ininterrumpida durante el periodo de prueba y un promedio de transmisión de 963 milisegundos. Ver Figura 12, con una muestra de 673 paquetes de mensajes.

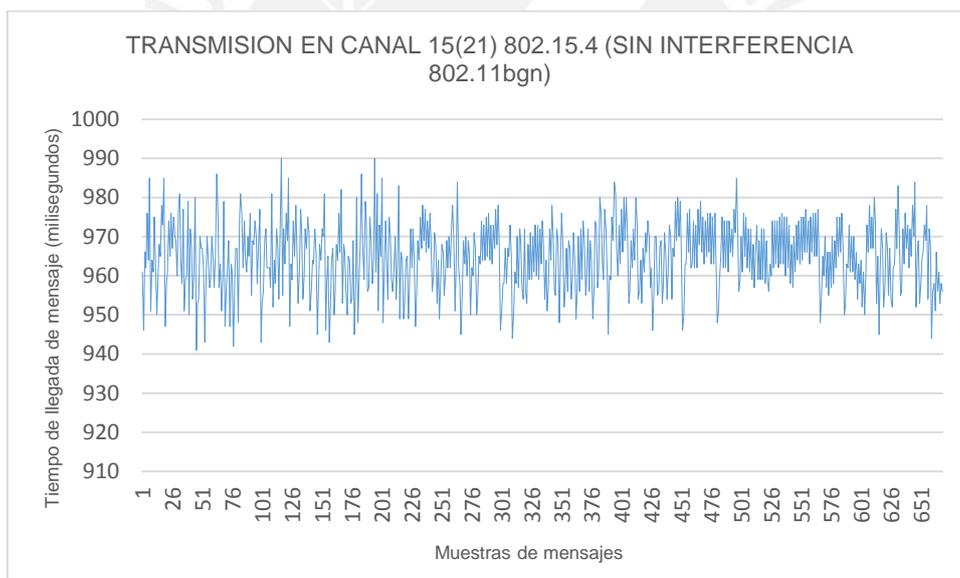


Figura 12: Transmisión en Canal 15 (21) IEEE 802.15.4 sin interferencia IEEE 802.11bgn. Fuente: Elaboración propia.

Utilizando el analizador de espectro se pudo observar la potencia existente durante la prueba de transmisión de paquetes entre los dos nodos 802.15.4 en la frecuencia 2455 MHz, centro del canal 15 (21). Las figuras 13 (a) y 13 (b) muestran dos momentos de captura de las señales de los canales utilizados de ambos protocolos, el canal 6 de IEEE

802.11bgn en la frecuencia 2437 MHz y el canal 26 de IEEE 802.15.4 en la frecuencia 2455 MHz, las cuales están totalmente separadas y sin posibilidad de interferencia.

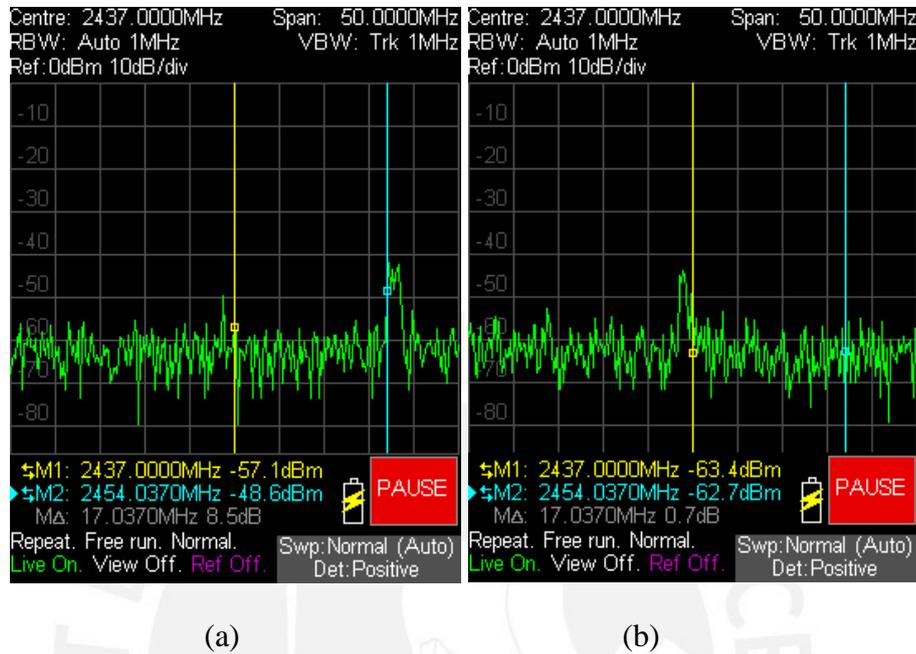


Figura 13: Espectro centrado aproximadamente en 2454MHz para IEEE 802.15.4 canal 15 (21)

Seleccionando un canal del IEEE 802.15.4 con interferencia IEEE 802.11gn:

En el mismo escenario de prueba configuramos los nodos transceptores Xbee para transmitir/recibir datos en el canal 17 o 11 (2435 MHz de ancho de canal de 5MHz) el cual se encuentra dentro del canal 6 del protocolo 802.11bgn (ver Figura 14, el ambiente de prueba el Access Point 802.11bgn).

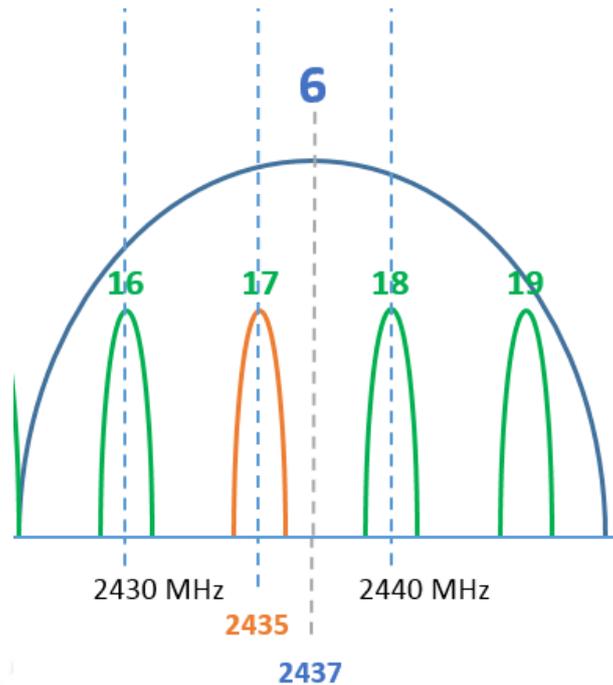


Figura 14: Canal 17 (11) IEEE802.15.4 dentro de canal 6 IEEE802.11g. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos son transmisión ininterrumpida pero con picos de demora mayores a 1000 milisegundos. A partir de la muestra 179 (ver Figura 15) se observa incremento de los tiempos de transmisión y posterior interrupción total de la comunicación en el canal 17 del protocolo 802.15.4.

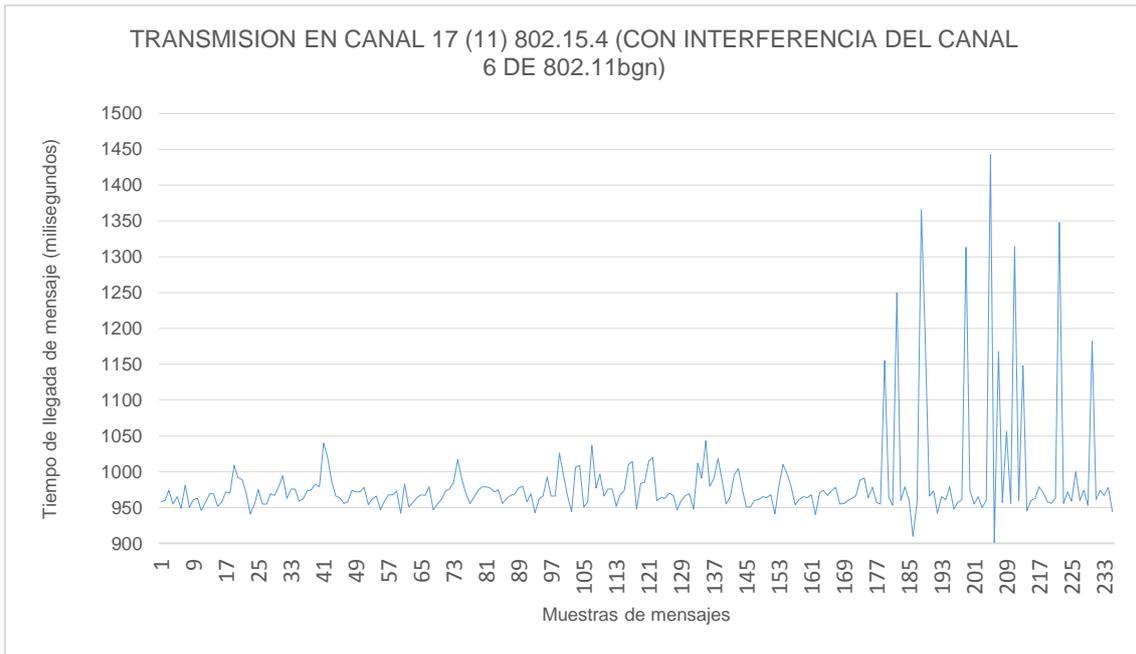


Figura 15: Transmisión en Canal 17 (11) IEEE 802.15.4 con interferencia de canal 6 de IEEE 802.11bgn. Fuente: Elaboración propia

De igual manera se utilizó el analizador de espectro para observar las señales y la potencia existente durante la prueba de transmisión de paquetes entre los dos nodos 802.15.4 en la frecuencia 2435 MHz, centro del canal 17 (11). Las figuras 16(a) y 16(b) muestran dos momentos de captura de las señales en la frecuencia 2437 MHz (canal 6 IEEE 802.11bgn) y la frecuencia 2435 MHz (canal 17 IEEE 802.15.4), en ambas figuras se puede observar que existe traslape entre las señales de los canales de ambos protocolos lo cual da la probabilidad de interferencia en la trasmisión de datos. En las figuras se observa también que en un momento la potencia en el canal del protocolo 802.11 (-49.3 dBm) es menor que la potencia en el canal del protocolo 802.15.4 (-40.4 dBm) (Figura 16(a)) y en otro momento la potencia en el canal del protocolo 802.11 (-56.8 dBm) es mayor que la potencia en el canal del protocolo 802.15.4 (-58.2 dBm) (Figura 16(b)), lo cual nos permite sustentar que quien tiene mayor potencia se impondrá para transmitir sus mensajes en la frecuencia compartida.

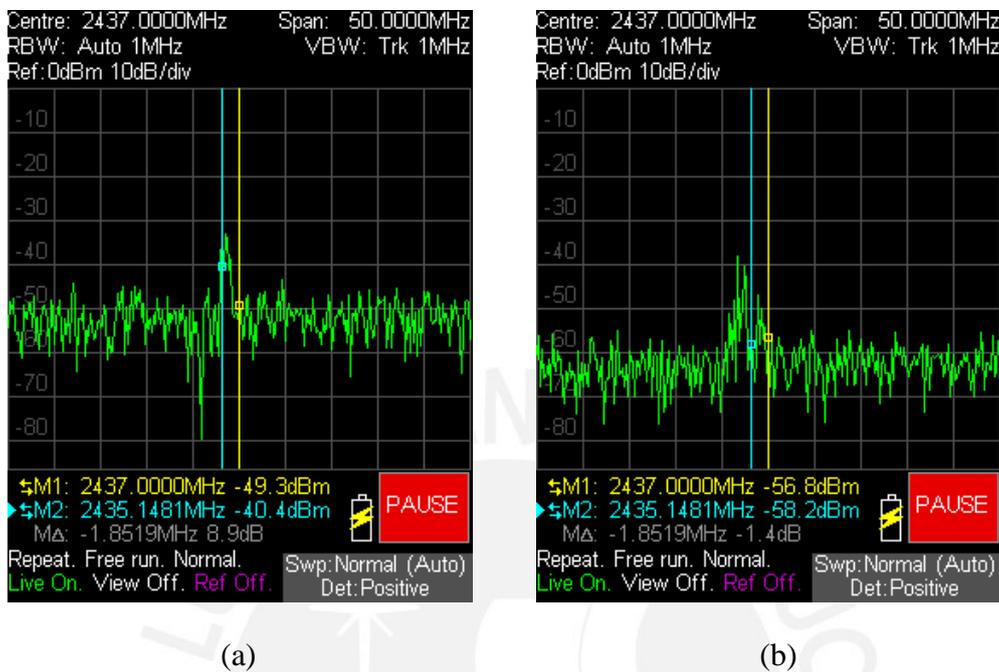


Figura 16: Espectro en la frecuencia 2435MHz para el IEEE 802.15.4 canal 17 (11)

4.5 Análisis y observaciones de la interferencia de la tecnología IEEE802.11 (WiFi) sobre la tecnología IEEE802.15.4 en 2.4GHz en ambientes externos.

Se realizó mediciones de la contaminación de señales en la banda de 2.4GHz de WiFi y una prueba de transmisión usando equipos IEEE 802.15.4. Las pruebas fueron hechas en la Av. La Mar entre la Av. Riva Agüero y la Av. Universitaria el 2 de noviembre de 2016.

4.5.1 Mediciones de redes inalámbricas en ambientes externos.

Para medir la potencia de las señales de los puntos de acceso-AP ubicados en la Av. La Mar se ha utilizado el módulo BaseBox2 de Mikrotik en la banda de 2.4GHz con una antena de 3 dBi, este equipo se utiliza para implementación de enlaces inalámbricos IEEE802.11 empresariales y no es un analizador de espectro por lo que no se ha

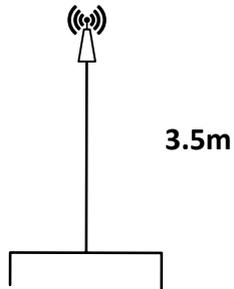
considerado la resolución de ancho de banda. Una de las funcionalidades de este equipo es escanear la intensidad de señal de los puntos de acceso IEEE802.11 cercanos al equipo en la zona de despliegue; en la Figura 17 se muestra una captura de pantalla del comando utilizado y sus resultados típicos de escaneo.

```
admin@MikroTik] > interface wireless scan wlan1 duration=20
Flags: A - active, P - privacy, R - routers-network, N - nstreme, T - tdma, W - wds, B - bridge
ADDRESS          SSID              CHANNEL          SIG   NF  SNR  RADIO-NAME
AP   BC:CA:B5:0A:8C:60 TELMEX           2412/20/gn      -67  -95  28
AP   F0:F2:49:B6:32:38 RACELEMA        2412/20/g       -80  -95  15
AP   A4:70:D6:D3:CF:E1 JIMMY            2412/20/gn      -83  -95  12
AP   04:18:D6:29:C6:56 CINEPLANETS2    2412/20/gn      -64  -95  31
PR WB D4:CA:6D:9C:AF:0F CamaleonChepita2 2412/20/b       -71  -95  24 D4CA6D9CAF0F
AP   D4:7B:B0:85:20:FA VALEXIA          2412/20/g       -82  -95  13
AP   38:4C:90:E9:D1:40 MARKETING        2412/20-Ce/gn   -77  -95  18
AP   20:25:64:5D:1D:58 CITYCLIMA1      2422/20/gn      -75  -95  20
AP   10:FE:ED:9E:36:A2 D-INTERNET      2422/20/gn      -69  -95  26
P    3C:1E:04:0C:B4:5A D-INTERNET      2422/20/gn      -71  -95  24
```

Figura 17: Comando realizado en el BaseBox2 para realizar escaneo de enlaces IEEE802.11. Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 18(a) y 18(b) muestran el módulo preparado para medición de señales IEEE802.11 para esta tesis. Las mediciones se realizaron a cada lado de la Av. La Mar y en la Figura 19 se muestran los 35 puntos donde se realizaron dichas las mediciones.

Nodo de medición de
señales WiFi



(a)



(b)

Figura 18: Módulo para la medición de la intensidad de señal de los AP en la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia.



Figura 19: Puntos de medición de la intensidad de señal de los AP en la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth.

En las figuras 20 y 21 se observa que existen por lo menos 38 *Access Point*-AP en cada punto de medición, esto es una cantidad alta.

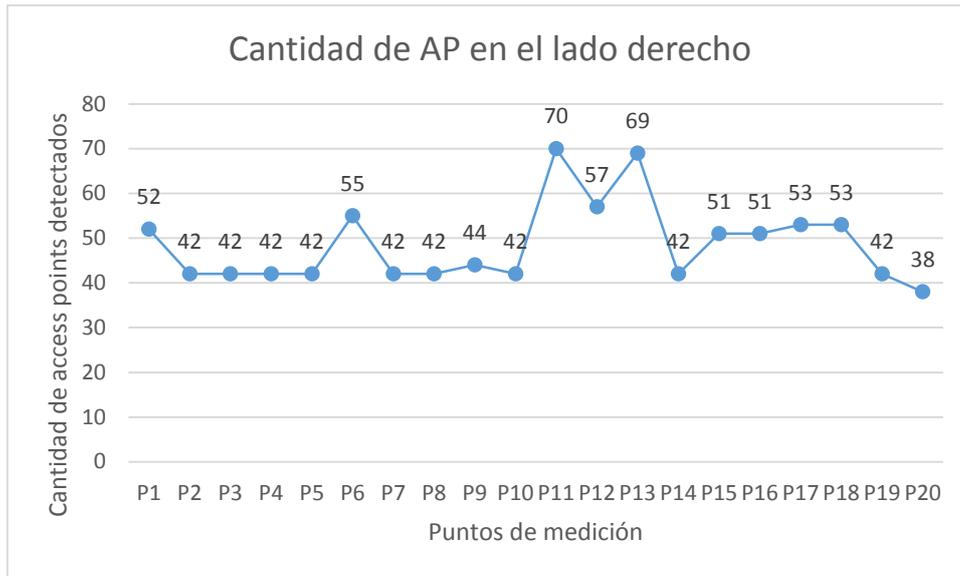


Figura 20: Cantidad de AP detectados por cada punto de medición en el lado derecho de la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia.

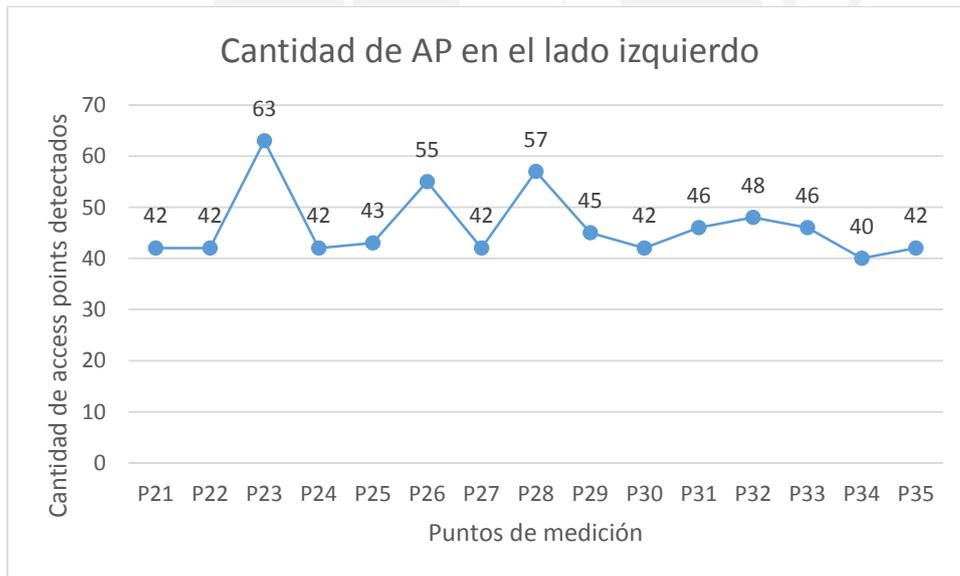


Figura 21: Cantidad de AP detectados por cada punto de medición en el lado izquierdo de la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 y en las figuras 22 y 23 se observa que la intensidad de la señal en cada punto está alrededor de -77 y -80 dBm, este es una intensidad alta comparado con la intensidad de -85 dBm (intensidad mínima de un equipo WiFi para tener acceso a la red

de datos con una pérdida de paquetes de 20% de 64Bytes); además los canales más utilizados son el canal 1, 6 y 11 de la red WiFi.

Tabla 11: Intensidad promedio de la señal de los AP en la Av. La Mar.

Lado derecho			Lado izquierdo		
Puntos de medición	Nivel de señal promedio (dBm)	Canales WiFi más utilizados	Puntos de medición	Nivel de señal Promedio (dBm)	Canales WiFi más utilizados
P1	-79.90	1 – 6 – 11	P21	-77.00	1 – 6 – 11
P2	-78.10	1 – 6 – 11	P22	-77.40	1 – 6 – 11
P3	-81.00	1 – 6 – 11	P23	-81.50	1 – 6 – 11
P4	-77.90	1 – 6 – 11	P24	-76.60	1 – 6 – 11
P5	-79.00	1 – 6 – 11	P25	-75.70	1 – 6 – 11
P6	-82.80	1 – 6 – 11	P26	-78.10	1 – 6 – 11
P7	-79.40	1 – 6 – 11	P27	-76.50	1 – 6 – 11
P8	-77.00	1 – 6 – 11	P28	-78.20	1 – 6 – 11
P9	-77.60	1 – 6 – 11	P29	-75.60	1 – 6 – 11
P10	-76.10	1 – 6 – 11	P30	-76.90	1 – 6 – 11
P11	-78.90	1 – 6 – 11	P31	-79.30	1 – 6 – 11
P12	-78.80	1 – 6 – 11	P32	-76.30	1 – 6 – 11
P13	-79.40	1 – 6 – 11	P33	-77.60	1 – 6 – 11
P14	-79.90	1 – 6 – 11	P34	-81.20	1 – 6 – 11
P15	-78.70	1 – 6 – 11	P35	-78.70	1 – 6 – 11
P16	-77.60	1 – 6 – 11	Promedio	-77.77	
P17	-79.80	1 – 6 – 11			
P18	-79.40	1 – 6 – 11			
P19	-79.60	1 – 6 – 11			
P20	-77.40	1 – 6 – 11			
Promedio	-78.92				

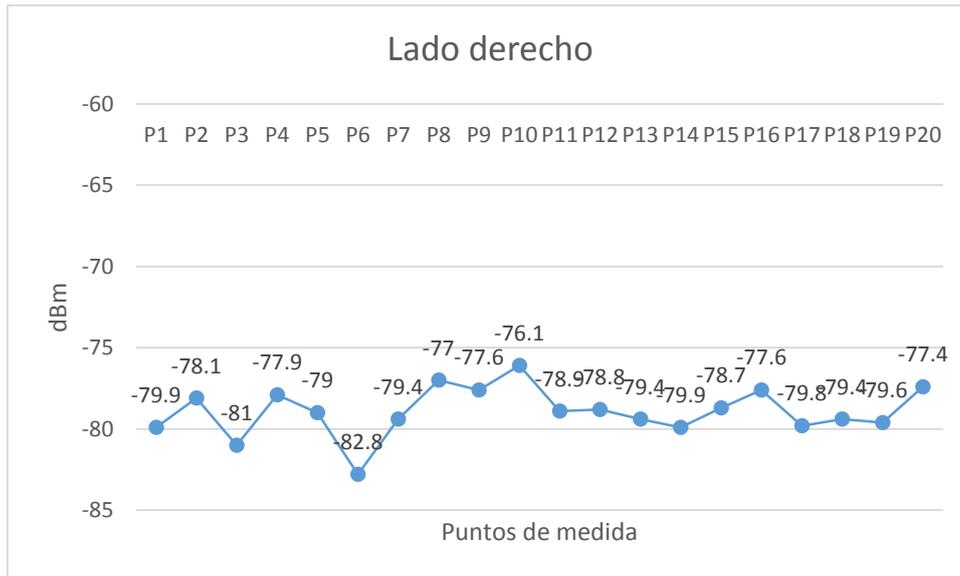


Figura 22: Intensidad promedio de señal de los AP en la Av. La Mar en el lado derecho. Fuente: Elaboración propia.



Figura 23: Intensidad promedio de señal de los AP en la Av. La Mar en el lado izquierdo. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 12 se muestra las distintas intensidades de los AP de algunos puntos de medición.

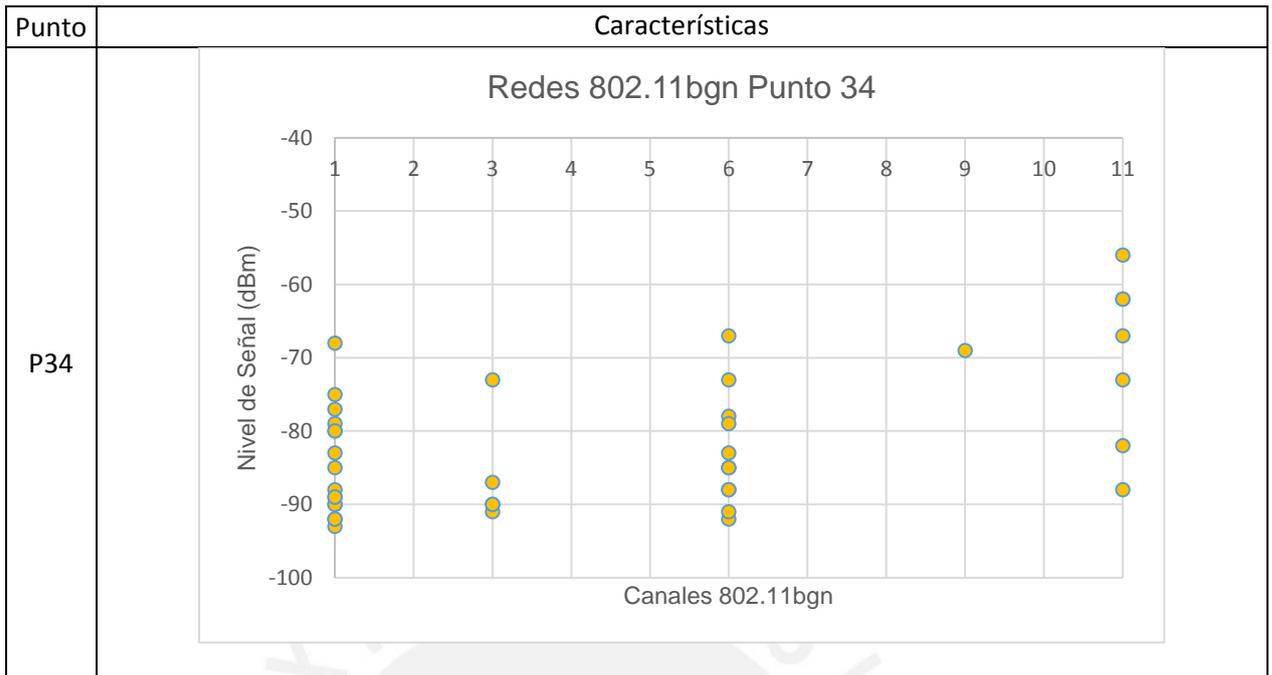
Tabla 12: Intensidad de señal de los AP en la Av. La Mar en algunos puntos de medición.

Punto	Características
P3	<p style="text-align: center;">Redes 802.11bgn Punto 3</p> <p style="text-align: center;">Canales 802.11bgn</p>
P6	<p style="text-align: center;">Redes 802.11bgn Punto 6</p> <p style="text-align: center;">Canales 802.11bgn</p>

Punto	Características
P11	<p style="text-align: center;">Redes 802.11bgn Punto 11</p> <p style="text-align: center;">Nivel de Señal (dBm)</p> <p style="text-align: center;">Canales 802.11bgn</p>
P15	<p style="text-align: center;">Redes 802.11bgn Punto 15</p> <p style="text-align: center;">Nivel de Señal (dBm)</p> <p style="text-align: center;">Canales 802.11bgn</p>

Punto	Características
P20	<p style="text-align: center;">Redes 802.11bgn Punto 20</p> <p style="text-align: center;">Nivel de Señal (dBm)</p> <p style="text-align: center;">Canales 802.11bgn</p>
P24	<p style="text-align: center;">Redes 802.11bgn Punto 24</p> <p style="text-align: center;">Nivel de Señal (dBm)</p> <p style="text-align: center;">Canales 802.11bgn</p>

Punto	Características
P28	<p style="text-align: center;">Redes 802.11bgn Punto 28</p> <p style="text-align: center;">Canales 802.11bgn</p>
P31	<p style="text-align: center;">Redes 802.11bgn Punto 31</p> <p style="text-align: center;">Canales 802.11bgn</p>



4.5.2 Pruebas de transferencia de tramas IEEE 802.15.4.

Se ha realizado dos pruebas entre el nodo 1 y el nodo 2, usando radios XBee-Pro en 2.4GHz en el canal 13 (D) del protocolo 802.15.4 que es de 2415MHz de ancho de canal de 5 MHz (este canal se encuentra en traslape con el canal 1 del protocolo 802.11bgn), con antenas de 3dBi y ubicado en trípodes a unos 3.5m de altura. La primera prueba es un enlace entre el nodo 1 el nodo 2 pero cruzados con una distancia de 150m, y la otra prueba es entre el nodo 1 y nodo 2 pero en el mismo lado de la calle con una distancia de 130m (ver figura 25), un esquema se muestra en la figura 24.



Figura 24: Nodos para la prueba de transferencia de tramas. Fuente: Elaboración propia.



Figura 25: Distribución de nodos en la Av. La Mar. Fuente: Elaboración propia sobre imagen de Google Earth.

De las pruebas de mediciones de contaminación en la banda de 2.4GHz, se conoce que un enlace en el mismo lado de la calle posee más interferencia que un enlace cruzado; esto se muestra en la tabla 13, donde la transmisión de un mismo lado se tiene unos 30% de pérdidas de mensajes comparados a los 10% que se tiene en enlace cruzado.

Se utilizó un programa hecho en Java para el envío de tramas a razón de aproximadamente 100kbps durante 5 minutos. En la Tabla 13 se muestra el resumen de los resultados.

Tabla 13: Resultado de la prueba de transmisión en la Av. La Mar.

Primera prueba: transmisión cruzada en la calle

mensajes transmitidos:	356
mensajes perdidos:	37 (10.4%)
tiempo promedio de transmisión de 808 bytes (1 mensaje):	977ms

Segunda prueba: transmisión a un mismo lado de calle

mensajes transmitidos:	280
mensajes perdidos:	89 (31.8%)
tiempo promedio de transmisión de 808 bytes (1 mensaje):	1676ms

De la tabla anterior se concluye que existe mayor pérdida de tramas en las radios o mensajes entre los nodos cuando el enlace está ubicado en el mismo lado la calle. Este efecto también se muestra en el retardo. En las figuras 26 y 27 se observa que el retardo es de unos 1600ms en enlaces ubicado a un mismo lado de la calle, y unos 1000ms en un enlace ubicado en un enlace cruzado.

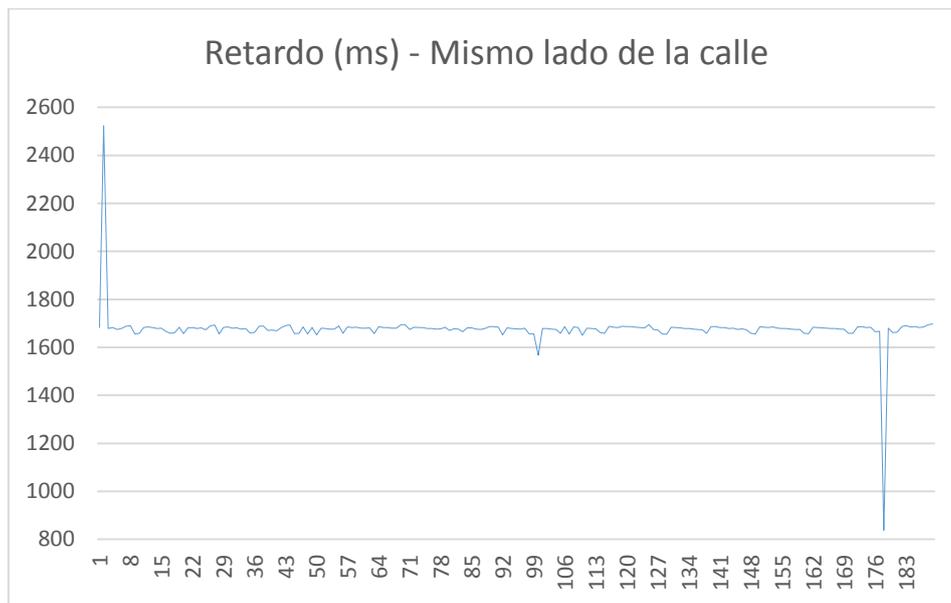
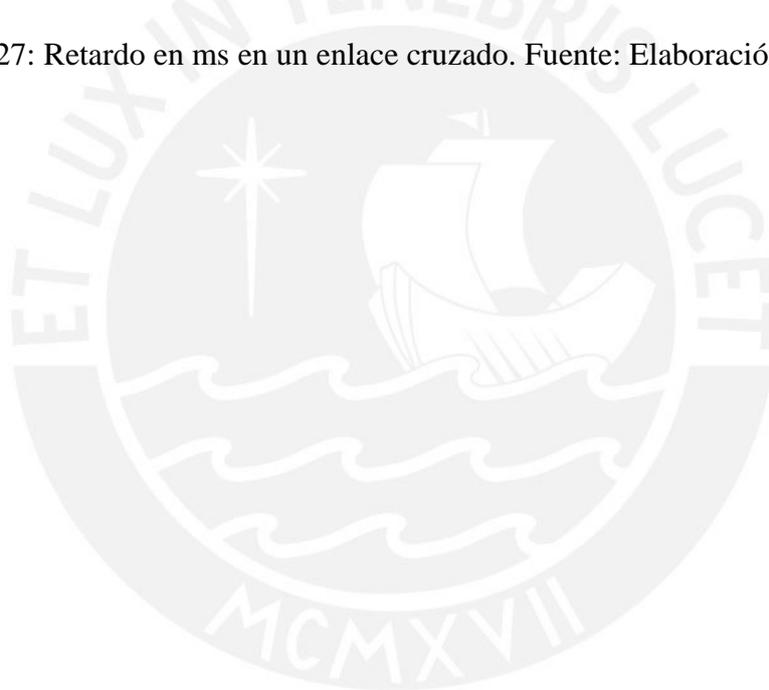


Figura 26: Retardo en ms en el enlace a un mismo lado de la calle. Fuente: Elaboración propia.



Figura 27: Retardo en ms en un enlace cruzado. Fuente: Elaboración propia.



5. Desarrollo de la Metodología.

Los estudios realizados hasta ahora comprueban que un despliegue de una red de sensores en ambientes externos utilizando banda ISM, y en especial en la banda de 2.4GHz usando IEEE802.15.4 tendrá problemas por causa de la interferencia en este ambiente. A continuación, se plantea una metodología para poder desplegar este tipo de redes evitando los problemas descritos.

En la Tabla 14 se muestra las partes de la Metodología planteada para el diseño, implementación, pruebas y despliegue. Las recomendación se han dividido en tres partes: Diseño y pruebas en Laboratorio, Mediciones en campo antes del despliegue y Despliegue y pruebas en campo.

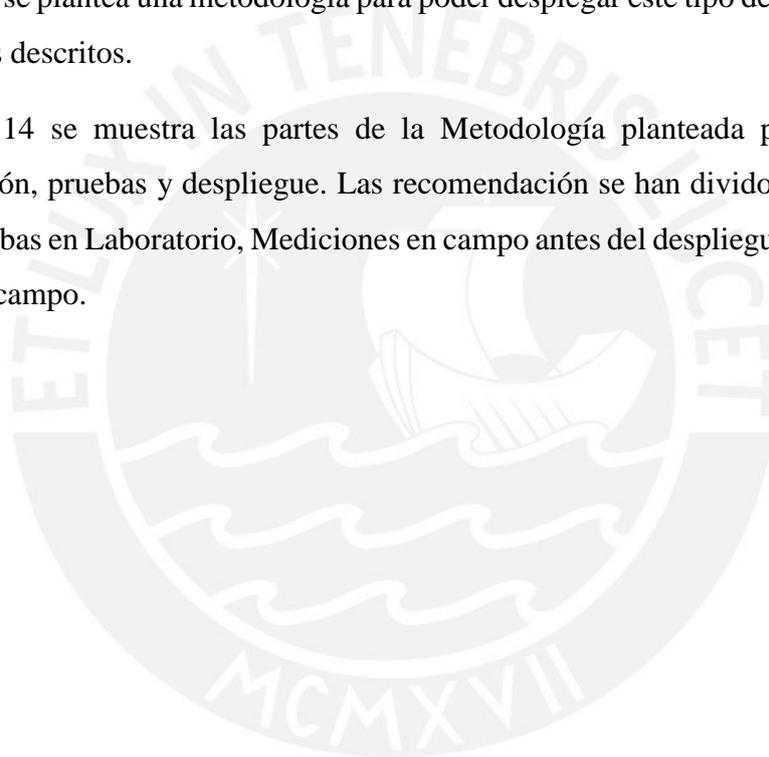
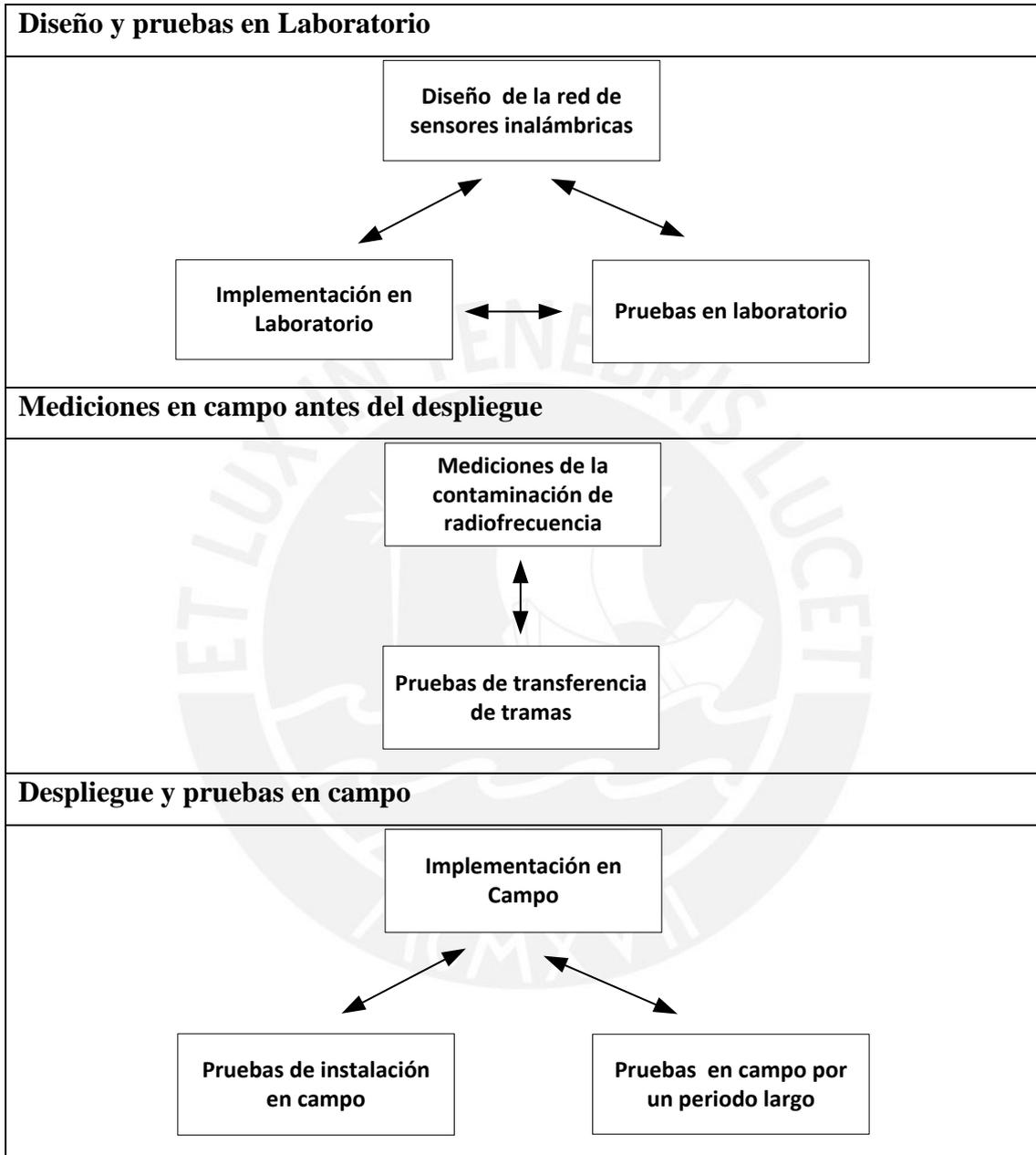


Tabla 14: Metodología planteada para el diseño e implementación de redes inalámbricas.



5.1 Diseño y pruebas en Laboratorio.

Se ha definido 3 principales puntos, que no son consecutivos pero siempre están interrelacionados: Diseño de la red de sensores inalámbricos, implementación en laboratorio y pruebas en laboratorio.

Diseño de la red de sensores inalámbricos:

El diagrama de flujo mostrado en la figura 28 define el proceso a seguir en el diseño de la red de sensores inalámbricos.

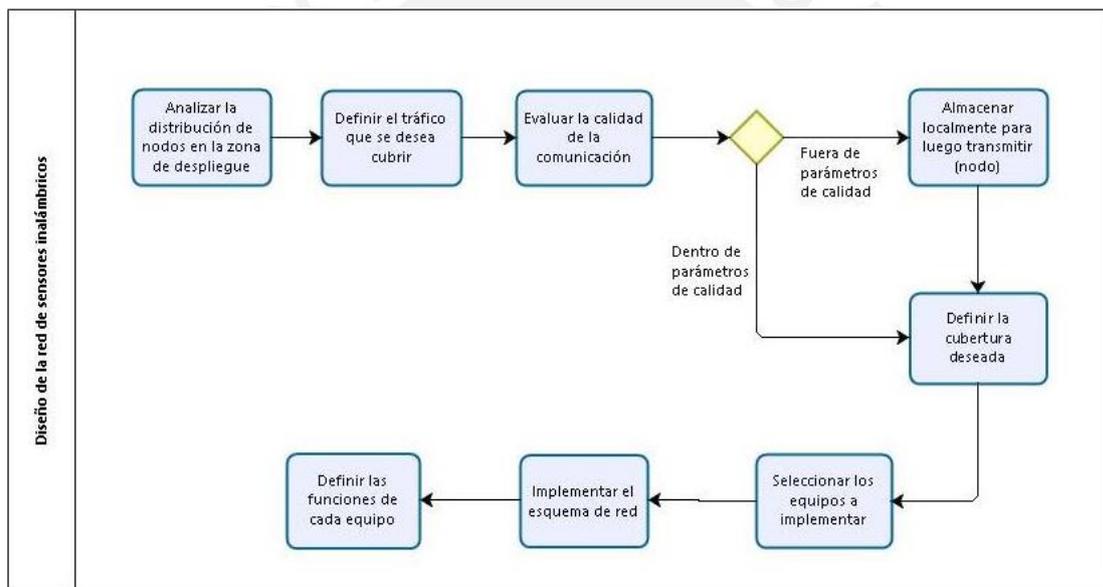


Figura 28: Diseño de la red de sensores inalámbricos. Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes numerales se describe cada paso del proceso en el diseño de la red de sensores inalámbricos.

1. Analizar la distribución de nodos en la zona de despliegue. Los enlaces típicos se muestran en la figura 29, donde puede existir un enlace en el mismo lado de la calle o un enlace cruzado entre frentes. Se debe crear los enlaces preliminares entre nodos sensores y puertas de enlace (Gateway). Se debe tener línea de vista entre el nodo y

el punto de enlace. Existe la posibilidad de encontrarse árboles en medio de las calles que impedirían el enlace a mayor distancia.

2. Definir el tráfico que se desea cubrir: Esto está relacionado al servicio que se le va dar a la red. El resultado de esta parte es obtener el la velocidad de transmisión en kbps que se requiere.
3. Evaluar la calidad de la comunicación: Entender que habrá pérdidas de paquetes en escenarios reales y es muy difícil predecir una medida exacta, por lo que en el diseño se debe prever que si la comunicación es pobre el nodo sensor debe ser capaz de almacenar localmente la data para después ser enviado.
4. Definir la cobertura deseada: Esto está relacionado a cuán lejos deberá llegar el enlace inalámbrico. Como se sabe al ser distancias tan cortas menores a 1km [7] [12], no existe modelo de propagación de radioenlaces especializados para este tipo de enlaces. Las redes de sensores tienen como característica principal que están formados por muchos nodos sensores (de 10 a más) y pueden formar enlaces punto a punto, punto a multipunto y malla, y todos están distribuidos en distancias cortas (alrededor de 100m); la propagación de las redes de sensores en zonas urbanas es compleja, existen obstáculos como vehículos, edificaciones, personas con equipos inalámbricos que se mueven, vegetación y la propia interferencia de redes inalámbricas analizada en esta tesis, todo esto causa disturbio al radio enlace, y esto dificulta tener un modelo de propagación especializado para una red de sensores específica [23]. Se sabe que existen modelos que tratan este tipo de redes, pero como recomendación se puede tomar las mediciones hechas en el Proyecto FINCYT donde para una potencia de 18dBm con antena de 3dBi y una sensibilidad máxima de -85dBm se puede lograr una distancia en línea de vista de unos 700m a una altura de 4m.

Para definir la cobertura se debe determinar lo siguiente:

- La frecuencia y el ancho de canal.
- Potencia y ganancia de la antena.
- La sensibilidad mínima del dispositivo inalámbrico relacionada al mínimo de tráfico requerido. Muchas veces los fabricantes de equipos no muestran en detalle la potencia y la sensibilidad por cada tipo de modulación, se sugiere extrapolar con los datos de otros equipos.

- Margen mínimo de 5dB a 10 dB para cubrir la degradación de la interferencia del ambiente.
- Pérdidas por conexiones.
- Margen de calidad de cobertura o de tráfico.

El resultado será obtener la distancia máxima a cubrir con el tráfico deseado y las alturas donde estarán ubicados los nodos sensores. Si no se logra el objetivo se tendrían que aumentar potencias o ganancias o disminuir pérdidas.

5. Seleccionar los equipos que se desea implementar.
6. Implementar un esquema de la red con sus respectivos parámetros de red y datos de radiofrecuencia.
7. Realizar un esquema de la configuración general de cada equipo y describir las funciones que deben cumplir estos equipos.

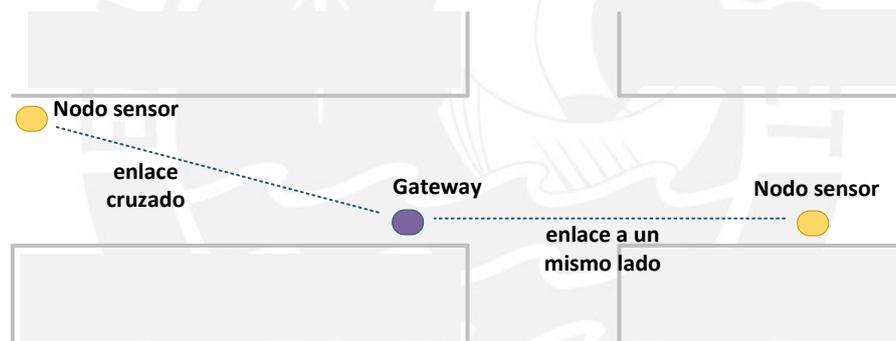


Figura 29: Distribución típica de los equipos de una red de sensores inalámbricas.
Fuente: Elaboración propia.

Implementación en laboratorio:

Se deberá realizar una implementación de todo el escenario de la red, sino se puede se debe implementar la parte más crítica; pero todo equipo deberá estar configurado para funcionar en su escenario real. También deben implementarse los servicios, después de hacer las pruebas a la red.

Pruebas en laboratorio:

La implementación en laboratorio no es un escenario real, aunque es posible implementar la red en un escenario exterior aún no se podría simular las condiciones reales del lugar donde se instalarán. Entonces esta parte está más hecha para comprobar el diseño de la red, principalmente las funciones que deberá cumplir cada dispositivo.

5.2 Medición en campo antes del despliegue.

Se definen 2 puntos en la medición de campo antes del despliegue: Medición de la contaminación de radiofrecuencia y Pruebas de transferencia de tramas.

Medición de la contaminación de radiofrecuencia:

Una vez seleccionado la zona de despliegue se debe realizar la medición de la contaminación de la radiofrecuencia, en el rango de frecuencias de interés. En la figura 30 se muestra un esquema de las ubicaciones donde se deben realizar las mediciones, esto se debe hacer en cada lado de la calle, específicamente entre el límite de la vereda y de la calzada, las mediciones deben ser realizados cada 10m aproximadamente. Esto se hace porque se ha visualizado que existirá mayor potencia más cerca de las viviendas que al centro de la calle, además los equipos de redes de sensores se ubicaran en este límite. Las mediciones se podrían hacer a una altura de 3m a 4m (posición habitual donde se podría implementar un nodo sensor). Si la frecuencia de trabajo está en 2.4GHz se recomienda hacerlo sólo a cada lado de la calles, pero si se usa en el rango de 900MHz se podría adicionar más puntos de medición que se haría en el medio de la calle.



Figura 30: Puntos de medición en la calle. Fuente: Elaboración propia.

En este escenario se debe medir principalmente la intensidad de la señal de las fuentes de contaminación y los canales utilizados por estas fuentes y su relación de señal a ruido. Se debe identificar los canales más utilizados en WiFi y escoger un canal IEEE 802.15.4 que no esté en el mismo lado que estos canales WiFi más usados. Se debe promediar la intensidad por canal, y si estos promedios no son valores comparables se podría sacar un promedio de estos promedios por canal, este promedio de intensidad será la base en nuestro diseño, es decir nuestro diseño debe superar esta intensidad, ¿y cuánto más sería?, para responder a esta pregunta se debería hacer pruebas variando el canal y la antena y la potencia, esta prueba se realizará como parte de otros trabajos. Pero si tomamos como referencia el trabajo de Goyal *et al.* [9] se concluye que las pérdidas de paquetes disminuyen del 100% al 0% cuando el SNR está entre 5 a 10dB. Entonces, como referencia, se deberá asegurar que el diseño deba superar en 5 a 10dB la intensidad promedio de la señal en el canal requerido.

Pruebas de transferencia de tramas.

Una vez seleccionado los equipos en base a la recomendación anterior se debe realizar una prueba de transferencia de tramas, paquetes o mensajes. Se debe implementar un enlace IEEE 802.15.4 de prueba, y fijarlo a una distancia mínimo de 100m y hacer las pruebas de dos tipos de enlaces como se muestra en la figura 31.

Mientras se está realizando las pruebas se deberá medir el nivel de señal y buscar la mejor frecuencia en la zona para poder ser utilizados en el despliegue (puede ser la del diseño u otra que no traslape a los canales WiFi más usados encontrados en el paso anterior), además se deberá medir la conectividad y la capacidad de la red como se muestra en la figura 31.

Con la frecuencia más adecuada, lograda en el paso anterior, se deberá establecer el tiempo de prueba total. Se recomienda un día completo, es decir, durante este tiempo, se

deberá medir el nivel de señal de recepción (si aún hay una tasa no aceptable de interferencia, por encima de un valor umbral preestablecido, se deberá cambiar de frecuencia); porque en un tiempo más largo se podrá conocer mejor el comportamiento de la interferencia.

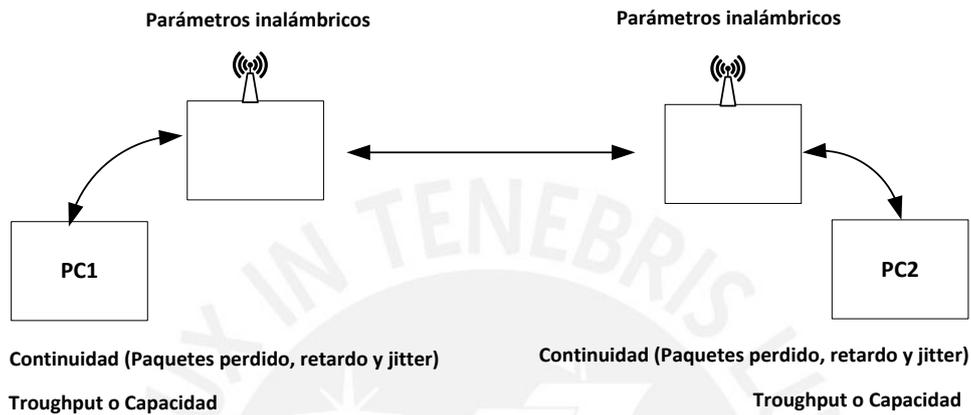


Figura 31: Mediciones de parámetros inalámbricos y de datos.

5.3 Despliegue y pruebas en Campo.

Se definen 3 etapas en el despliegue y pruebas de campo: Implementación en campo, Pruebas de instalación en campo y Pruebas por un periodo largo de tiempo.

Implementación en campo

Los equipos ya fueron configurados inicialmente y en base a esto se podría asumir que deberían funcionar correctamente. Pero antes se deberá realizar la instalación siguiendo las buenas prácticas de instalación y despliegue de redes inalámbricas [24] para la instalación de los componentes energía, infraestructura, dispositivos de telecomunicaciones, protección eléctrica, etc.

Pruebas de instalación en campo.

En la figura 25 se muestra un escenario para las pruebas. Generalmente se deberá realizar tres pruebas, para realizar estas pruebas no se cuenta con aplicaciones o comandos directamente. Se tiene que desarrollar un programa para esto. Este programa debe estar instalado en las computadoras ubicadas a los extremos de cada radio.

- Medición de parámetros inalámbricos. En esta parte se debe hacer las mediciones principalmente del nivel de señal de recepción, potencia de transmisión, distancia entre nodos, entre otros
- Medición de la capacidad del enlace. En esta parte se deberá medir la velocidad en kbps que soporta el enlace.
- Continuidad del enlace. En esta parte se deberá verificar la conectividad del enlace, paquetes perdidos, retardo y *jitter*.

Una vez verificado el funcionamiento de la red, se procedería a hacer las pruebas de los servicios.

Pruebas por un periodo largo de tiempo

Cuando la red ya está operativa, se deberá seguir realizando mediciones, quizás no las mediciones de capacidad, porque ocuparían todo el enlace, pero sí las correspondientes a los otros parámetros (*throughput*, PER, retardo, *jitter* etc.) con el fin de poder analizarlos si existiesen problemas para poder así mejorar el diseño de forma iterativa. Tener en cuenta que la interferencia cambiará en todo caso debido a múltiples factores.

6. Discusiones.

De las investigaciones revisadas y pruebas realizadas se conoce que es ineludible la existencia de una degradación en la transferencia de datos de una red de sensores inalámbricos que utilizan IEEE802.15.4 en la banda ISM desplegada en ambientes urbanos externos. Entonces se debe plantear soluciones para poder realizar este despliegue minimizando los impactos negativos sobre este tipo de redes.

6.1 Supuestos:

El estudio en esta tesis se ha hecho bajo los siguientes supuestos.

- a. Este el Proyecto 153-FINCYT se plantea una red ad-hoc de sensores inalámbricas de topología estrella utilizando banda ISM.
- b. El análisis se realiza sólo en la banda 2.4GHz.
- c. El uso de radios XBee utilizando el estándar IEEE 802.15.4.
- d. El modelo de tráfico planteado es flujo constante por pulsos y se transmite cada cierto tiempo, donde, cada minuto, o un rango de tiempo comparable, se envían tramas desde el nodo sensor hasta la puerta de salida durante un breve instante. Es decir, para tener una aplicación de tiempo real, el tráfico debería ser como el mostrado en la figura 32.

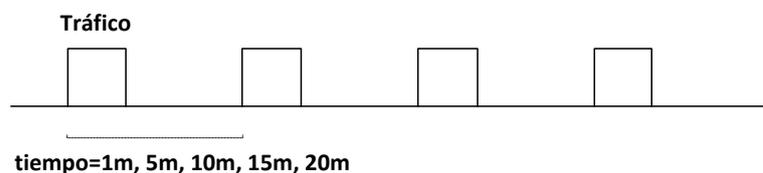


Figura 32: Modelo de tráfico. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Alternativas al problema de la interferencia:

- a. Para el supuesto a. resulta impracticable utilizar otra banda que no sea ISM para desplegar redes ad-hoc. Ello debido principalmente al costo que implica acceder a una banda licenciada. Pero se podría cambiar de topología. La topología planteada es del tipo *ad-hoc* usando IEEE 802.15.4 y en modo estrella, es decir los nodos sensores inalámbricamente envían las mediciones a una puerta de enlace y es éste quien accederá a una red comercial para reenviar las mediciones al servidor. Se podría hacer que cada nodo sensor se conecte a una red comercial por medio del envío de SMS (red 2G) o a un servicio de datos móviles (red 3G o 4G) para enviar directamente las mediciones al servidor. Esto trae un costo adicional, que se tiene que evaluar. Además se conoce que el año 2016, la GSMA (Asociación GSM) anunció que la industria móvil acordó impulsar el crecimiento comercial del IOT (Internet de las cosas) creando el *Low Power Wide Area* (LPWA) en el espectro autorizado, específicamente, para el *Extended Coverage GSM for the Internet of Things* (EC-GSM-IoT) para redes 2G. Una de las características de esta red de acceso es su relativo gran alcance y baja velocidad de transmisión, que precisamente se requieren para este tipo de aplicaciones. Queda solo esperar que las operadoras puedan brindar servicios con esta red de acceso; aunque actualmente un operador nacional ya está ofreciendo un servicio de acceso para este tipo de aplicaciones pero no es muy difundido (MovistarIoT <https://iot.telefonica.com/>).
- b. Para el supuesto b. El análisis en la tesis se realiza en la banda de 2.4GHz porque es la banda donde existe una gran cantidad de dispositivos. En el proyecto 153-FINCYT se ha hecho uso de la banda ISM en 900MHz pero sólo se ha instalado la red de sensores dentro de la Universidad a distancias de unos 100m entre el nodo sensor y la puerta de enlace. Al ser una banda que actualmente ha sido modificada por el MTC [11] y que se usa generalmente para teléfonos inalámbricos y transceptores tipo walkie-talkie se tiene que hacer un estudio en condiciones similares a lo hecho en esta tesis. No se desarrolla aquí principalmente porque no se cuenta con equipos en esta banda para poder analizar la medición de interferencia. Además la banda de 900 MHz

tiene pocos canales disponibles para IEEE802.15.4 y se tiene que tener cuidado de no interferir a las bandas vecinas porque ya son bandas licenciadas.

- c. Para el supuesto c. Actualmente existen otras tecnologías *ad-hoc* inalámbricas para este tipo de aplicaciones. Pero, de la misma manera, hacen uso de bandas ISM y se estaría en la misma situación. Ilvas, Kim y Radha [21] plantean el uso de varios radios ubicados en posiciones físicas distintas para disminuir los efectos de la interferencia, como si se tratara de un arreglo basado en diversidad espacial (ver figura 33). Chepuri, De Francisco y Leus [22] hacen uso de radios cognitivas, es decir radios que analizan en el tiempo el mejor canal en donde se podría transmitir con menor degradación de la calidad.

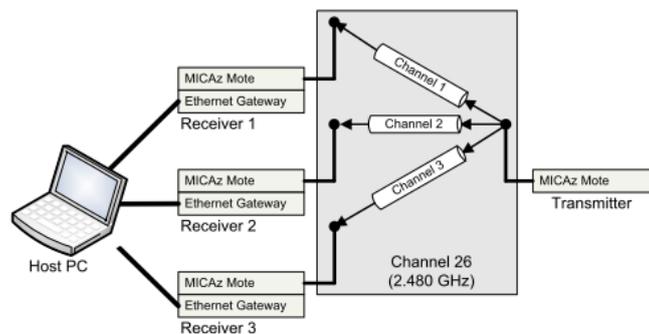


Figura 33: Implementación de tres radios IEEE802.15.4 para un mismo tráfico. Tomado de "*Reducing Packet Losses in Networks of Commodity IEEE 802.15.4 Sensor Motes Using Cooperative Communication and Diversity Combination*" [21].

- d. Para el supuesto d. El modelo de tráfico también influye en la calidad de transmisión de las mediciones. Se sabe que la velocidad necesaria en este tipo de redes está en el rango de las decenas de kbps (de 10 hasta unos 100kbps) pero si la aplicación es de tiempo real entonces debe existir continuidad en el envío de los datos hacia el servidor. Por tanto se necesita de una red que esté siempre en funcionamiento. Existen aplicaciones que no son urgentes, entonces se puede realizar mediciones, por ejemplo durante un día, y enviar toda la colección de las mediciones en un sólo instante. En este caso la red *ad-hoc* tendría otras características.

Conclusiones

- El uso de una red ad-hoc que usa el estándar IEEE802.15.4 para la implementación de redes inalámbricas de sensores resulta ser viable en diversidad de condiciones de despliegue, lo que lleva a afirmar que es una alternativa de uso preferente para diversas aplicaciones que contribuyen a lo que ahora se denomina la revolución del Internet de las Cosas. Pero debe siempre prestarse mucha atención a las limitaciones derivadas del uso de bandas ISM sin importar que el despliegue sea en ambientes internos o externos ya que siempre existirá degradación en la transferencia de las tramas o mensajes.
- Se ha analizado resultados de investigaciones donde se estudian los efectos de interferencia en 2.4GHz sobre redes ad-hoc implementados con IEEE 802.15.4 en la misma banda. Allí se verifica y concluye que sí existe degradación en la transferencia de las tramas; pero todas estas investigaciones son realizadas en ambientes internos. Sobre esta base, el presente trabajo ha comprobado esta degradación en ambientes internos y, además y más importante, los ha experimentado y medido en ambientes urbanos externos.
- En esta tesis se ha realizado un análisis de la interferencia en 2.4GHz en ambientes urbanos externos con el objetivo de mejorar el diseño de redes de sensores inalámbricos que usan IEEE 802.15.4 en la banda 2.4GHz. Para realizar las pruebas se restringe el estudio a la condición que el nodo sensor sea instalado a una altura aproximada de 3.5m a 4m. A esta altura se realizó la medición de la intensidad de la señal de los AP en la Av. La Mar entre la Av. Riva Agüero y la Av. Universitaria y se ha encontrado que existe mucha contaminación inalámbrica. Se identificaron alrededor de 40 AP en cada punto de medición, y, si se promedia la intensidad en cada punto de medición se han encontrado intensidades que están alrededor de los -77dBm y -80dBm (+/-1dB de resolución). Estos niveles corresponden a intensidades altas, capaces de interferir y degradar las señales afectando entre el 10% y 30% de la transferencia de las tramas o mensajes de un enlace IEEE 802.15.4 en 2400MHz.

Existe mayor degradación si el enlace está a un mismo lado de la calle. El enlace de prueba tuvo una distancia de alrededor de 140m. Además los canales más utilizados como AP WiFi son los canales 1, 6 y 11.

- En base a las pruebas se ha formulado una metodología que recomienda cómo proceder en el diseño, implementación, despliegue y pruebas de verificación para redes inalámbricas de sensores que hagan uso IEEE 802.15.4 en la banda 2.4GHz y que sean desplegados en ambientes urbanos externos.
- Para mejorar el diseño de los enlace IEEE 802.15.4 en 2.4GHz se debe medir la intensidad de la contaminación inalámbrica y obtener un promedio, y sobre este promedio mejorarlo en no menos de 5 a 10dB, lo que será el respaldo de potencia que se debe tener en cuenta al momento del diseño. Las pruebas fueron hechas con las mismas radios y antenas que se utilizaron para la implementación de la red de sensores en el proyecto 153-FINCYT. En base a esto, ya no se podría usar radios de mayor potencia porque es la máxima encontrada en el mercado (18dBm) y solo se podría aumentar la ganancia de la antena o disminuir la distancia de cobertura, en todo caso.
- Como ya se conocen los efectos de la interferencia en la banda ISM entonces se podría utilizar otras alternativas, como usar la banda ISM de 900MHz previa evaluación que considere la reducción en número de canales disponibles, el posible uso de una variante de diversidad, usar radios cognitivas o cambiar el modelo de tráfico para que no sea de flujo continuo.



Trabajos Futuros

- Implementar un enlace punto a punto usando la radio XBee Pro en 2.4GHz para realizar pruebas con tramas en ambientes externos pero variando la ganancia de la antena y el canal de trabajo. Todo ello para mejorar la recomendación de la diferencia de 5dB a 10dB que se debe dar como respaldo en el diseño de redes de sensores por encima del nivel promedio de potencia de interferencia encontrada en la zona.
- Realizar el análisis de la misma manera como se ha hecho en la tesis pero en la banda ISM de 900MHz.
- Realizar las mediciones de interferencia en un tiempo largo (una semana) y utilizar varios dispositivos para realizar las mediciones en distintos puntos al mismo tiempo. De esta manera se podrá conocer mejor el comportamiento de la contaminación en radiofrecuencia.



Bibliografía

- [1] I. Bennis, H. Fouchal, O. Zytoune and D. Aboutajdine, "Carrier sense range effect on multipath routing performances in Wireless Sensor Networks," *Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2014 Federated Conference on*, Warsaw, 2014, pp. 1073-1078. doi: 10.15439/2014F436
- [2] S. Shankar, D. Kundur and A. Sprintson, "Enhanced availability in randomly deployed wireless sensor networks via hybrid uni/omni-directional antennas," *MILCOM 2008 - 2008 IEEE Military Communications Conference*, San Diego, CA, 2008, pp. 1-7. doi: 10.1109/MILCOM.2008.4753565
- [3] E. Rondini, S. Hailes and Li Li, "Distributed Wireless Ad hoc Grids with bandwidth control for collaborative node localisation," *MILCOM 2008 - 2008 IEEE Military Communications Conference*, San Diego, CA, 2008, pp. 1-8. doi: 10.1109/MILCOM.2008.4753585
- [4] L. W. Yeh, M. S. Pan and Y. C. Tseng, "Two-Way Beacon Scheduling in ZigBee Tree-Based Wireless Sensor Networks," *Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing, 2008. SUTC '08. IEEE International Conference on*, Taichung, 2008, pp. 130-137. doi: 10.1109/SUTC.2008.51
- [5] Z. Liang and D. Zhao, "Quality of Service Performance of a Cognitive Radio Sensor Network," *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, Cape Town, 2010, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICC.2010.5502787
- [6] Y. Xu, J. Hu and L. Shen, "Analog network coding interference mitigation methods for wireless sensor networks," *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Paris, 2012, pp. 516-520. doi: 10.1109/ISWCS.2012.6328421
- [7] W. Guo, W. M. Healy and M. Zhou, "Impacts of 2.4-GHz ISM Band Interference on IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Network Reliability in Buildings," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 9, pp. 2533-2544, Sept. 2012. doi: 10.1109/TIM.2012.2188349
- [8] Bai Chen, Li-li Wang and Yan-jin Ai, "Link interference prediction-based topology control algorithm for 3-D wireless sensor networks," *The 2nd International Conference on Information Science and Engineering*, Hangzhou, China, 2010, pp. 2168-2171. doi: 10.1109/ICISE.2010.5689350

- [9] M. Goyal, S. Prakash, W. Xie, Y. Bashir, H. Hosseini and A. Durrezi, "Evaluating the Impact of Signal to Noise Ratio on IEEE 802.15.4 PHY-Level Packet Loss Rate," *Network-Based Information Systems (NBIS), 2010 13th International Conference on*, Takayama, 2010, pp. 279-284. doi: 10.1109/NBiS.2010.97
- [10] International Telecommunication Union, ITU-T Telecommunication Standardization Sector, Applications of Wireless Sensor Networks in Next Generation Networks, February 2014
- [11] Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, Resolución Ministerial N° 199-2013-MTC/03, 12 de Abril de 2013
- [12] UIT-R Sector de Radiocomunicaciones de la UIT, Influencia de los equipos industriales, científicos y médicos (ICM) sobre los servicios de radiocomunicaciones, Ginebra, 2011
- [13] International Telecommunication Union ITU-T Telecommunication Standardization Sector, Requirements for support of ubiquitous sensor network (USN) applications and services in the NGN environment Y.2221, 01/2010
- [14] IEEE Computer Society, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Std 802.15.4 -2006, New York, USA
- [15] La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT, UIT-R SM.1056 Limitación de las radiaciones procedentes de equipos industriales, científicos y médicos (ICM), 1994
- [16] Frenzel Lou, What's the difference between IEEE 802.15.4 and ZigBee Wireless? Electronic Design, New York, 2013
- [17] Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, Plan Nacional de Atribución de Frecuencias-PNAF, Lima, Febrero/2008
- [18] IEEE Computer Society, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11 - 2012, New York, USA
- [19] IEEE Computer Society, Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks, IEEE Std 802.15.3 - 2003, New York, USA
- [20] IEEE Computer Society, Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks(WPANs), IEEE Std 802.15.1 - 2005, New York, USA
- [21] M. U. Ilyas, M. Kim and H. Radha, "Reducing Packet Losses in Networks of Commodity IEEE 802.15.4 Sensor Motes Using Cooperative Communication and Diversity Combination," *INFOCOM 2009, IEEE*, Rio de Janeiro, 2009, pp. 1818-1826. doi: 10.1109/INFCOM.2009.5062102.

- [22] S. P. Chepuri, R. de Francisco and G. Leus, "Performance evaluation of an IEEE 802.15.4 cognitive radio link in the 2360-2400 MHz band," *2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Cancun, Quintana Roo, 2011, pp. 2155-2160. doi: 10.1109/WCNC.2011.5779466
- [23] E. Greenberg and A. Sheinberg, "Statistical channel model for wireless sensor networks deployment in suburban environment," *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, 2015, pp. 1-5.
- [24] Perez, Reinaldo. *Wireless Communications Design Handbook: Interference into Circuits: Aspects of Noise, Interference, and Environmental Concerns*. Academic Press, 1998.

