

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y
COMPUTACIÓN

Estudio de congestión y calidad de las conexiones en las bandas ISM de 2,4
y 5 GHz en la zona urbana céntrica de la ciudad de Guayaquil.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

Autores:

Gendry Eduardo Vega Maldonado

Marco Antonio Villegas Cañar

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2022

DEDICATORIA

Para mis padres y abuelos, que siempre me han acompañado, y para mis compañeros con los cuales, a lo largo de la carrera, pude compartir experiencias.

Gendry Eduardo Vega Maldonado

Dedicado a mis queridos padres, hermanos y abuelos que me ayudaron de alguna manera y estuvieron siempre para apoyarme en este camino. Así mismo a cada una de las personas que conocí a lo largo de mi etapa estudiantil.

Marco Antonio Villegas Cañar

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Sr. Christian Barco y a todos los miembros de Reparándolo S.A. por permitirnos el uso de su oficina para la instalación u operación de los equipos empleados para este estudio. Así como al Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles de la ESPOL, en especial al Ph.D. Francisco Novillo y MSc Eduardo Chancay Rojas.

Gendry Vega & Marco Villegas

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Gendry Eduardo Vega Maldonado y Marco Antonio Villegas Cañar damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Gendry Eduardo Vega Maldonado

Marco Antonio Villegas Cañar

EVALUADORES

PhD. Francisco Vicente Novillo Parales

PROFESOR DE LA MATERIA

Ing. Alfredo José Núñez Unda

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El crecimiento de las nuevas tecnologías, y el aumento de usuarios que hacen uso de comunicaciones inalámbricas, especialmente wifi, ha causado el incremento del número de puntos de acceso inalámbricos desplegados en el Ecuador, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Dicho crecimiento ha provocado una notable saturación del espectro en las bandas ISM de 2,4 GHz y 5 GHz, lo que resulta en conexiones inalámbricas menos fiables y más lentas. Con la tasa actual de incremento de la población (y el número de usuarios de tecnologías inalámbricas), se espera una saturación aún mayor. Se presenta un estudio del espectro, en el cual se analiza el grado de saturación/interferencia y el desempeño resultante de las conexiones wifi en las bandas 2,4 GHz y 5 GHz. El estudio hace uso de un computador, una antena tipo discono, un periférico de SDR, un enrutador wifi y un teléfono móvil, junto al entorno LabVIEW, y recolecta datos de potencia espectral, y tasa de bits del enlace. Se elaboró un modelo para evaluar la pérdida de velocidad por efecto de la interferencia, que se aplicó sobre la información recopilada acerca de la saturación del espectro electromagnético. Los datos muestran que los efectos de la congestión sobre un canal son leves, pero pueden introducir una degradación momentánea, pero severa, de la velocidad del enlace. En la banda de 2,4 GHz, el impacto general de la congestión es aceptable, si bien es especialmente perjudicial para aplicaciones que requieren altas velocidades y alta estabilidad. Se sugiere que, para observar el avance de la saturación del espectro, así como del efecto sobre el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas, se realicen mediciones en un periodo más largo, y datos adicionales en la banda de 5 GHz.

ABSTRACT

The growth of new technologies and the increase in wireless telecommunication technology users (Wi-Fi, in particular), has caused a rise in the number of deployed wireless access points (APs) in Ecuador, most noticeable in high-density urban areas. Such increase in AP has produced an overcrowding in the ISM 2.4 GHz & 5 GHz bands' frequency spectrum, which results in unreliable, slower wireless connections. An aggravated spectral overcrowding is expected due to the current population growth rate. This document showcases a spectrum study in the 2.4 GHz and 5 GHz bands, related to overcrowding (interference) severity and Wi-Fi connection performance. This study uses a computer, a discone antenna, an SDR peripheral, a Wi-Fi router and a smartphone, along software such as LabVIEW, and collects power spectrum and link speed data. A model to assess the link speed reductions caused by interference has been developed and applied to the electromagnetic spectrum crowding data. Data shows that the effects of spectrum crowding on a wireless channel are mild. However, temporary yet severe link speed reductions can be realized. In the 2.4 GHz band, the overall impact of spectrum crowding is manageable, although especially detrimental for high speed, high stability applications. It is advised to measure data for a longer period, and collect additional data in the 5 GHz band, to better oversee the evolution of spectrum overcrowding and their effect on wireless communications performance.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DECLARACIÓN EXPRESA.....	IV
EVALUADORES.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
ÍNDICE GENERAL	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XII
CAPÍTULO 1	13
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Definición del problema.....	14
1.2. Justificación del problema.....	14
1.3. Objetivos	15
1.4. Propuesta de solución.....	15
1.5. Metodología	15
CAPÍTULO 2	17
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Espectro radioeléctrico.....	17
2.2. Estándar IEEE 802.11	18
2.2.1. IEEE 802.11 N	18
2.2.2. IEEE 802.11 AC.....	18

2.3.	Interferencia	19
2.4.	Atenuación	20
2.5.	SINR y capacidad del canal	21
2.6.	Tasa de bits.....	22
CAPÍTULO 3	23
3.	DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.....	23
3.1.	Descripción del escenario.....	23
3.2.	Descripción de la solución	23
3.3.	Planteamiento inicial.....	24
3.4.	Diagramas de funcionamiento.....	25
3.4.1.	Análisis de congestión.....	25
3.4.2.	Análisis de desempeño	26
CAPÍTULO 4	28
4.	ANÁLISIS DE DATOS Y GRÁFICAS RESULTANTES	28
4.1.	Análisis de congestión.....	28
4.1.1.	Escenario	28
4.1.2.	Resultados	29
4.1.3.	Análisis en hora pico.....	31
4.2.	Análisis de desempeño	33
4.2.1.	Escenario	34
4.2.2.	Análisis sin interferencia.....	34
4.2.1.	Análisis con interferencia.....	35
CAPÍTULO 5	37
5.	CONCLUSIONES.....	37
ANEXOS	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Canales con su respectiva frecuencia central.....	25
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Localización del sitio de toma de muestras.	23
Figura 3.2 Topología de la conexión entre la computadora, la antena y el periférico SDR.	24
Figura 3.3 Topología de conexión entre el router y el teléfono celular.	24
Figura 3.4 Topología de conexión del USRP N210 con la computadora.	26
Figura 4.1 Ubicación de los equipos.	28
Figura 4.2 Valores máximos, mínimos y promedios del espectro en la banda de 2.4 GHz.	29
Figura 4.3 Gráfica de potencia promedio por cada canal vs frecuencia 30	30
Figura 4.4 Gráfica del espectro por horas 30	30
Figura 4.5 Potencia promedio por canal en el horario de 12 pm. 31	31
Figura 4.6 Espectro promedio de canal máximo, mínimo e intermedio en el horario de 12 pm..... 32	32
Figura 4.7 Disponibilidad de los canales en el horario de 12 pm. 32	32
Figura 4.8 Espectro con valores máximos, mínimos y promedios en el horario de 12 pm. 33	33
Figura 4.9 Ubicación de equipos en el escenario de trabajo..... 34	34
Figura 4.10 Gráficas en función de la potencia del generador de señal. 35	35
Figura 4.11 Gráfica de velocidad de enlace en función de la SINR calculada. 36	36

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Canales en la banda de 5 GHz.....	40
Anexo 2 Canales de wifi en la banda de 2,4 GHz.	40
Anexo 3 Configuración del sistema.....	40
Anexo 4 Diagrama de flujo del programa de análisis espectral (LabVIEW)	42
Anexo 5 Diagrama de flujo del proceso de prueba de desempeño	43
Anexo 6 Diagrama de flujo del programa de análisis de potencia espectral – Interferencia	44
Anexo 7 Diagrama de flujo del programa de análisis de datos – Desempeño.....	44
Anexo 8 Lugar de medición de ruido para los días 1 y 2	45
Anexo 9 Lugar de medición de ruido para el día 3.....	45
Anexo 10 Espectro promedio de la banda de 2,4 GHz en el horario de 12 pm.....	46
Anexo 11 Gráfica del espectro del canal mínimo, máximo e intermedio.....	46
Anexo 12 Toma de mediciones del ruido de fondo con un analizador espectral Anritsu MS2732E	47
Anexo 13 Medición de valores promedio del ruido, gráficas por día de medición.	48
Anexo 14 Medición de valores mínimos de ruido, gráficas por día.	48
Anexo 15 Medición de valores máximos de ruido, graficado por día.	49
Anexo 16 Medición en ESPOL.....	49
Anexo 17 Análisis de las Muestras sin Interferencia.....	52
Anexo 18 Análisis de las Muestras con Interferencia.....	52

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las telecomunicaciones han estado en constante evolución, llegando a convertirse en parte integral de la vida de las personas. Principalmente, se utilizan para transmitir información, ya sea para audio o – de forma más general – datos. Además, esta transmisión puede ser por medio alámbrico e inalámbrico, siendo este último el que permite establecer comunicación con mayor facilidad tanto en implementación como en costes.

Los dispositivos electrónicos que se usan en las comunicaciones inalámbricas han ido evolucionando para brindar mayor velocidad, estabilidad y ancho de banda. A su vez, el consumidor presenta exigencias como es el coste, rapidez y calidad, que dependen de los casos de uso del usuario. Es así como se ha provocado que, en el mercado, exista mayor demanda de dispositivos que operan en el espectro radioeléctrico y, al existir un incremento de estos, llegan a saturar el mismo.

Actualmente, en las comunicaciones inalámbricas, las bandas más utilizadas son las de 2,4 y 5 GHz, que, de acuerdo con la ARCOTEL, son bandas no licenciadas, y que pueden ser utilizadas sin la obtención de un título habilitante [1]. Teniendo en cuenta que cualquier persona o entidad puede emplear el espectro en esas bandas, no es inusual hallar un caso de uso desmedido, lo que, en muchos casos, provoca la aparición de traslapes (interferencia), ocasionando problemas en el desempeño de los sistemas que usan estas frecuencias. En consecuencia, el acceso se vuelve inestable y la tasa de transmisión baja.

Este proyecto trata del estudio del funcionamiento y el desempeño de sistemas inalámbricos que operan en las bandas ISM de 2,4 y 5 GHz en la zona urbana céntrica de la ciudad de Guayaquil.

1.1. Definición del problema

El problema general es el constante crecimiento del uso de sistemas de comunicación inalámbrica en la zona urbana céntrica de la ciudad de Guayaquil, en la cual existen múltiples sistemas que operan en las bandas ISM de 2,4 GHz y 5 GHz.

Entre estos sistemas tenemos: redes de área local como Wi-Fi, redes WSN como Zigbee, enlaces punto a punto, enlaces punto a multipunto, entre otros.

El centro de la ciudad es un área comercial, donde el número de usuarios (y puntos de acceso para los sistemas de comunicación) aumenta con el tiempo. Los usuarios requieren conectarse, simultáneamente, a los diferentes servicios que necesitan y, ante esta necesidad, el número de AP activos crece, y el espectro se va saturando. Como resultado, se presentan altos niveles de interferencia, el acceso a la red se vuelve inestable y los usuarios perciben una experiencia insatisfactoria, como baja tasa de datos, demoras en el servicio o en recibir respuestas, o lentitud en general.

1.2. Justificación del problema

La banda de 2,4 y 5 GHz es una banda que evidencia altos niveles de congestión, en la cual no es posible ofrecer conexiones rápidas y fiables a usuarios nuevos. Se necesita estudiar el estado actual de las bandas ISM para determinar si sigue siendo posible proporcionar conectividad inalámbrica a más usuarios y con una mayor calidad en esa región del espectro.

Se evalúa implementar soluciones en bandas de mayor frecuencia (con mejor latencia y tasas de transferencia, pero menor cobertura) con el fin de aliviar la congestión de las bandas de menor frecuencia.

Esto permitiría dar las bases para el uso no licenciado de la banda de 6 GHz para redes locales inalámbricas y, en consecuencia, la comercialización de puntos de acceso inalámbricos que operan con la norma IEEE 802.11ax (Wifi 6/6E) para su venta a los clientes, con lo que se espera sean utilizados para que se aproveche el nuevo espectro (con

posibilidad para conexiones de mayor velocidad) y las bandas ya existentes se descongestionen.

1.3. Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo principal “Estudiar el funcionamiento y el desempeño de sistemas inalámbricos que operan en las bandas ISM de 2,4 y 5 GHz en la zona urbana céntrica de la ciudad de Guayaquil”. Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Desarrollar un banco de pruebas para la evaluación de la calidad de una conexión wifi en un entorno con interferencia.
- Estudiar los niveles de interferencia presentes en áreas urbanas de interés.
- Evaluar la calidad de las transmisiones en puntos con un gran número de puntos de acceso.

1.4. Propuesta de solución

Medir y evaluar el estado de las bandas de 2.4 y 5 GHz en escenarios interiores y exteriores, dentro de la zona urbana céntrica de la ciudad de Guayaquil.

1.5. Metodología

El proyecto está dividido en las siguientes etapas: inicio, planificación, ejecución y cierre. En la etapa de inicio, se plantea la propuesta del proyecto. Aquí se declaran las condiciones requeridas en el área de trabajo y se determina la naturaleza del resultado del proyecto.

En la etapa de planificación, se delimita el área de estudio, se seleccionan los equipos, programas y procedimientos que se aplicarán en la etapa de ejecución, y se desarrollan las pruebas previas a la obtención de datos en el campo. Es en esta etapa donde se seleccionan

los analizadores espectrales, los programas para análisis de rendimiento de conexión y los puntos donde hay concentración de transmisores inalámbricos.

Luego, en la etapa de ejecución, se desarrollan las pruebas con las herramientas seleccionadas y se recopilan datos, los cuales son analizados. En esta fase, se obtienen datos de potencia espectral, ancho de banda de canales, valores de relación señal-ruido-interferencia (SINR), velocidades de enlace y valores de latencia.

Para la etapa de cierre, se generan los estudios del espectro en el área de trabajo. Se producirá primero un estudio de interferencia, con la información sobre potencia espectral, interferencia y uso de canales. Otro estudio, de desempeño, analiza la calidad de las conexiones según su velocidad de enlace.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Espectro radioeléctrico

La Ley Orgánica de Telecomunicaciones define al espectro radioeléctrico como el “conjunto de ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin necesidad de guía artificial utilizado para la prestación de servicios de telecomunicaciones, radiodifusión sonora y televisión, seguridad, defensa, emergencias, transporte e investigación científica, entre otros” [2].

En los últimos años, el espectro radioeléctrico ha tenido un incremento exponencial de la demanda, ya que sirve para la comunicación de varios servicios. Por esto, aparecen nuevas tecnologías y se expande el uso de las ya existentes para conexión inalámbrica. Puesto que el espectro es un recurso natural limitado, este se satura y congestiona cuando está siendo sobreexplotado.

Actualmente, las tecnologías inalámbricas de mayor expansión, las WLAN, operan en las bandas de frecuencias de 2.4 y 5GHz, las mismas que son destinadas para aplicaciones ISM, que son de uso libre y no requieren licencia de operación.

- **Banda 2.4 GHz:** Esta banda de frecuencias de uso libre abarca, en el Ecuador, las frecuencias entre 2400 y 2483,5 MHz (inclusive). Se puede usar para sistemas de red local inalámbrica, señales de control y transferencias periódicas [3].
- **Banda 5 GHz:** Esta banda ocupa de 5,15 a 5,85 GHz. Es de uso libre, aunque los sistemas que usan las frecuencias entre 5150 y 5350 GHz requieren el uso de selección dinámica de frecuencia (DFS) en algunas jurisdicciones [3].

2.2. Estándar IEEE 802.11

Este estándar gobierna los protocolos que manejan las redes inalámbricas de área local. Originalmente, el estándar 802.11-1997 tenía una tasa de bits máxima de 2 Mbps, aunque ha tenido varias mejoras con sucesivas actualizaciones de la norma. Se llegó a una tasa de bits de 54 Mbps tanto en la banda de 2,4 GHz (con la revisión 802.11g) como en la de 5 GHz (con la revisión 802.11a) gracias a nuevas técnicas de modulación y codificación. Avances posteriores incrementaron la tasa de bits a los 600 Mbps con la revisión 802.11n [4].

Las revisiones del estándar en las que operan las redes inalámbricas tanto en la banda de 2.4 y 5 GHz son IEEE 802.11n y IEEE 802.11ac, respectivamente.

2.2.1. IEEE 802.11 N

Esta versión del estándar trabaja tanto en la banda de 2,4 GHz como en la banda de 5 GHz. Es posterior a, y compatible con, las versiones 802.11 a/b/g. Tiene una tasa de bits máxima de 600 Mbps. Puede operar con canales de 20 y 40 MHz. Hace uso de modulación por división ortogonal de frecuencia (OFDM) y tecnología MIMO [5].

2.2.2. IEEE 802.11 AC

Esta versión del estándar trabaja a 5 GHz. Introduce una modulación más densa (256-QAM, en comparación a 64-QAM de la enmienda 802.11n), mayores anchos de banda de canal (80 MHz, 80+80 MHz y 160 MHz) y el mecanismo MIMO en canal descendente. Posee una tasa de bits máxima de 6,93 Gbps [6].

2.3. Interferencia

La señal que se propaga en un canal de comunicación inalámbrico puede verse afectada mientras se propaga desde el transmisor hacia el receptor, ya que en el entorno pueden aparecer señales indeseadas que se introducen al espectro radioeléctrico, las cuales pueden alterar la señal que se está propagando. A esta alteración se la llama interferencia, y puede ser causada por obstáculos físicos o, en su defecto, otras redes inalámbricas.

Los principales tipos de interferencia que afectan a las redes inalámbricas son las interferencias de canal adyacente y las interferencias co-canal.

- **Interferencia de canal adyacente:** Es la interferencia causada por el desbordamiento de la señal en los canales adyacentes a aquel en el que se está transmitiendo. La mayor parte de esta interferencia es debido al mal filtrado.
- **Interferencia co-canal:** Es la interferencia que se da por transmisores externos que operan en la misma frecuencia que un sistema dado, insertando señales indeseadas sobre la señal que se está transmitiendo. Esta interferencia aparece por la reutilización de las mismas frecuencias para distintos servicios.

Existen 3 niveles de interferencia: el nivel admisible, cuando no afecta a las bandas adyacentes, el aceptable, que interfiere sin actuar sobre las demás bandas, y el perjudicial, que compromete y afecta a los demás servicios de radiocomunicación [1].

Es así como la interferencia llega a provocar problemas en las transmisiones inalámbricas, como la pérdida de la información. También cabe señalar que, para darse cuenta de

la presencia de interferencia, se puede detectar si la calidad de la señal baja, hay problemas al iniciar una conexión o retrasos al transferir información.

2.4. Atenuación

La atenuación es la pérdida de potencia que puede sufrir una señal, sea esta acústica, eléctrica u óptica, al propagarse en el medio durante su camino desde el transmisor al receptor [7]. En los sistemas inalámbricos, la señal que se transmite siempre será afectada por la atenuación, y esta depende de factores como es ubicación, objetos y las características del medio de propagación, en el cual puede existir:

- **Reflexión:** El reflejo o rebote de señal que se produce al encontrarse con un obstáculo, sea una superficie u objeto [8].
- **Absorción:** La reducción de potencia al atravesar un objeto, que depende de la densidad del material [8].
- **Difracción:** La generación de ondas secundarias por la obstrucción de superficies irregulares o con bordes filosos [8].
- **Dispersión:** Hace que la onda incidente irradie su energía en diferentes direcciones al golpear contra una superficie u objeto [8].
- **Refracción:** Una onda, al penetrar varios medios, cambia de velocidad al pasar de un medio a otro [9].

De esta manera, la atenuación se convierte en un factor de suma relevancia al momento de establecer una conexión inalámbrica, ya que provoca la debilitación de la señal original que se transmite y, si no se compensa adecuadamente, resulta en una transmisión deficiente.

2.5. SINR y capacidad del canal

La SINR es la razón entre la intensidad de la señal que se está transmitiendo con el nivel de ruido en el canal y la suma de las intensidades de las señales que interfieren, el cual sirve para evaluar la calidad de la señal [10] y se expresa como indica la ecuación (1).

$$SINR = \frac{S}{I + N} \quad (1)$$

En donde S es la potencia de la señal que se utiliza, I la potencia (total) de interferencia de la otras señales y N la potencia de ruido, todas estas en escala lineal.

En la mayor parte de los sistemas de comunicación, la potencia de interferencia tiende a ser mayor que la potencia del ruido, lo que provoca que la primera sea la mayor contribuyente a la degradación de la señal. Con mayor interferencia, se reduce la capacidad en el canal. Esto afecta a la tasa de bits de la transmisión, porque está limitada por esta capacidad. Según el teorema de Shannon, la capacidad del canal C se define como indica la ecuación (2) [11].

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{N} \right) \quad (2)$$

Donde B es el ancho de banda del canal, y la razón P/N es la SNR. La ecuación (2), entonces, indica que el rendimiento de la conexión inalámbrica se ve afectado por la SINR, y que, si el valor de la SINR es alto, la velocidad de datos será más alta.

2.6. Tasa de bits

La tasa de bits en telecomunicaciones hace referencia al número de bits que son transferidos por segundo; actualmente se mide en Mbps (megabits por segundo). Es una métrica para la velocidad de transferencia de datos de una conexión. Para las transmisiones inalámbricas en la banda de 2.4 y 5 GHz, la tasa de bits va a depender de la modulación, codificación, ancho de canal y el nivel de señal [12].

CAPÍTULO 3

3. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

3.1. Descripción del escenario

Para el diseño de la solución se procedió a elegir la zona para desarrollar el estudio, la cual se encuentra en el centro de Guayaquil. Se trata de un edificio que está delimitado por las calles Gral. Córdova al oeste, la calle Dr. Alfredo Baquerizo Moreno al este y la calle Junín al norte, como se muestra en la Figura 3.1. Dicho edificio está ubicado en una zona bancaria y comercial, donde se procederá a colocar los equipos para realizar las mediciones.



Figura 3.1 Localización del sitio de toma de muestras.

3.2. Descripción de la solución

Las mediciones constan de dos etapas, donde la primera es la medición del espectro, y la segunda es la de calidad (tiempo de respuesta y velocidad) del enlace inalámbrico.

Para realizar las mediciones del espectro, se hace uso de un periférico de radio definida por software, una antena tipo discono y una computadora como se indica en la Figura 3.2.

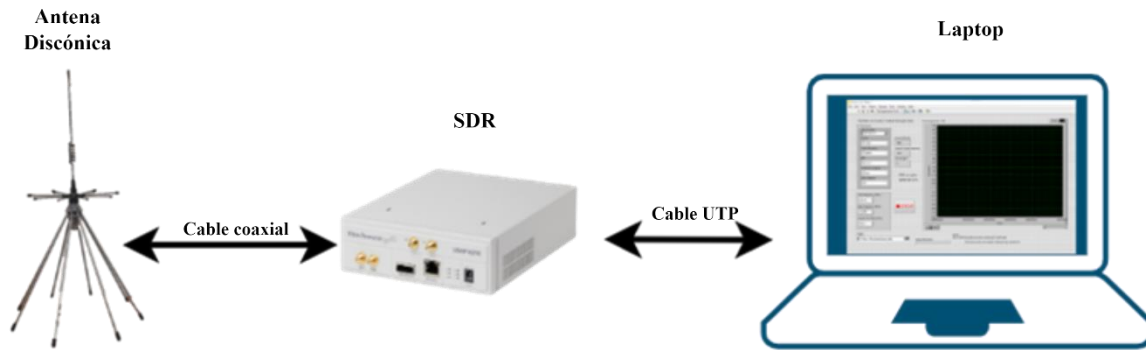


Figura 3.2 Topología de la conexión entre la computadora, la antena y el periférico SDR.

Por otro lado, para las mediciones de calidad, se utiliza un teléfono celular y un enrutador wifi, como se indica en la Figura 3.3. En conjunto, estos equipos permiten medir la velocidad de conexión del enlace y la latencia entre sí.

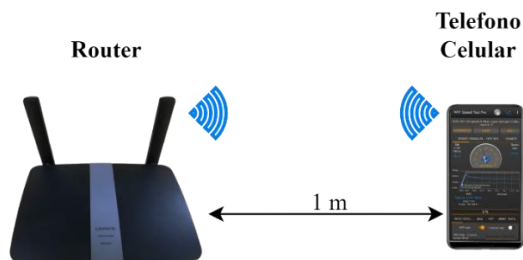


Figura 3.3 Topología de conexión entre el router y el teléfono celular.

3.3. Planteamiento inicial

Los equipos se colocan cerca de la ventana del sitio escogido, con una separación de 1 metro entre cada dispositivo, y se realizan pruebas para medir la potencia espectral y el rendimiento del enlace. Para la primera parte, se trabaja con un periférico SDR USRP N210 y un VI de análisis espectral en LabVIEW, a través de los cuales se realizan mediciones de potencia

en las frecuencias de 2400-2500 GHz. Para la última parte, se accede a la información del wifi del teléfono celular.

Tabla 3.1 Canales con su respectiva frecuencia central

Canal	Frecuencia Inferior	Frecuencia Central	Frecuencia superior
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
7	2.426	2.437	2.448
8	2.431	2.442	2.453
9	2.436	2.447	2.458
10	2.441	2.452	2.463
11	2.446	2.457	2.468

Los canales que se analizan dentro de la banda de 2,4 GHz van desde el 1 hasta el 11, los cuales poseen un ancho de banda de 22 MHz. Esto significa que cada canal tiene un límite inferior ubicado 11 MHz por debajo, y un límite superior que está 11 MHz por encima de su frecuencia central, tal y como se muestra en la *Tabla 3.1*.

3.4. Diagramas de funcionamiento

3.4.1. Análisis de congestión

Para la primera parte de las mediciones, se usa la computadora para almacenar datos y controlar el USRP N210 mediante LabVIEW. El periférico se conecta a la computadora con un cable Ethernet (UTP) y un adaptador de red USB 3.0 a Gigabit Ethernet como se muestra en la *Figura 3.4*.

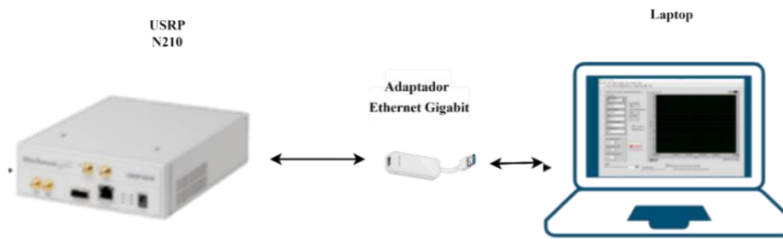


Figura 3.4 Topología de conexión del USRP N210 con la computadora.

Mediante el entorno de desarrollo LabVIEW, se hace uso de un VI para registro de potencia espectral, en el cual se ingresa la información del USRP utilizado, la región del espectro a analizar, el ancho de banda de cada medición, el número de muestras y la ruta de guardado para los datos de salida. El VI primero recorta el ancho de banda al 60% para evitar el efecto de filtro del USRP, luego divide el rango de frecuencias objetivo en bloques limitados por el ancho de banda recalculado, barre cada bloque de frecuencia y guarda los valores de potencia recibida en un archivo CSV.

Después de obtener estas muestras por el lapso de 3 días, se procesan estos datos con el fin de obtener un valor promedio de las muestras, y después identificar el canal más usado, el menos utilizado y un canal intermedio, con los que realizar posteriormente las pruebas de desempeño.

3.4.2. Análisis de desempeño

Este análisis se realiza en un lugar sin transmisores en la banda de frecuencias de 2,4 GHz, que se encuentra en el campus Gustavo Galindo de la ESPOL. Se hace uso de un enrutador wifi y un teléfono móvil para medir el estado de la conexión inalámbrica entre los equipos, junto a un analizador espectral. Primero, se toman mediciones cada minuto para establecer el caso

base, que es una conexión sin interferencias. El teléfono captura los datos del enlace wifi, mientras que el analizador obtiene la potencia espectral. Después, se emplea un generador de señales con una antena para introducir interferencia sobre el canal. Aquí, se anotan los valores de rendimiento del enlace en función de la potencia transmitida por el generador. Finalmente, se toma la potencia de interferencia recibida con el analizador espectral y el enrutador apagado.

De los datos guardados en el teléfono, se extrae la tasa de bits del enlace, el esquema de modulación y el RSSI, mientras que el nivel de ruido, la potencia espectral, la potencia de la señal del router y la potencia de la señal interferente aislada (sin la potencia del router) se obtienen desde los datos del analizador espectral. Con esos datos, se relaciona la potencia interferente con la potencia del generador, se calcula la SINR y se grafica el comportamiento de la velocidad del enlace en función de la interferencia/SINR.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE DATOS Y GRÁFICAS RESULTANTES

En esta sección se presenta la ubicación de los equipos, así como los resultados de los análisis de congestión y de desempeño, que se analizarán individualmente más adelante.

4.1. Análisis de congestión

4.1.1. Escenario

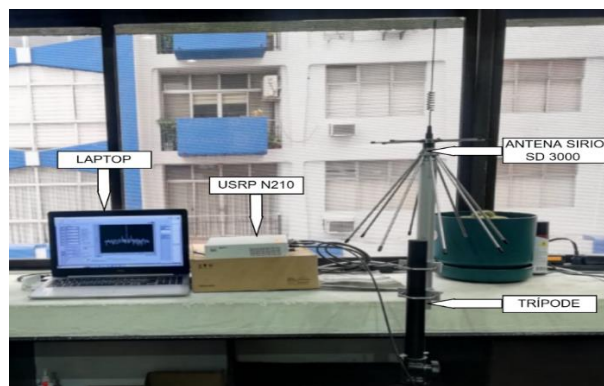


Figura 4.1 Ubicación de los equipos.

Los equipos se colocan lo más cerca posible a la ventana para poder considerar el escenario de interiores y parte de un escenario de exteriores urbano. Se observa el periférico SDR (el USRP N210 de la Figura 4.1), que se conecta con un cable coaxial a una antena discono Sirio SD 3000 N, montada en un trípode. El periférico es controlado por la laptop, que ejecuta LabVIEW para tomar y almacenar datos del espectro.

Los datos de potencia espectral tienen que ser procesados posteriormente. El primer paso es la supresión de los picos causados por fuga del oscilador local de la SDR, que aparecen cada 240 puntos en las muestras. Posteriormente, se obtienen los valores promedio, máximos y

mínimos para proporcionar una vista de toda la banda. Los siguientes procesos incluyen determinar la potencia de cada canal.

4.1.2. Resultados

Con las muestras del espectro que se obtuvieron en las mediciones de 3 días en el horario de 8 am a 6 pm, se procede a obtener el valor promedio, máximos y mínimos del espectro.

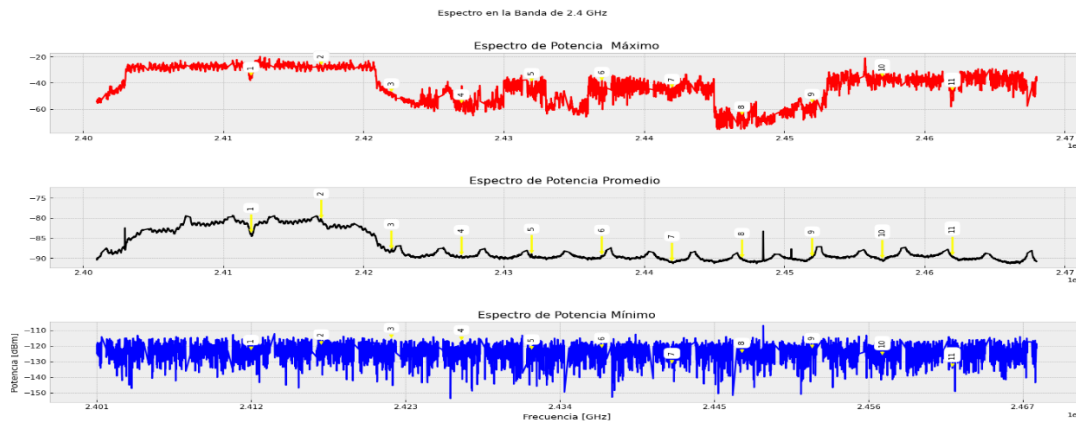


Figura 4.2 Valores máximos, mínimos y promedios del espectro en la banda de 2.4 GHz.

En la gráfica del espectro de la banda de 2.4 GHz de la Figura 4.2, si se analiza los máximos (en rojo), se puede observar que existen valores altos tanto en los canales 1 y 2 (picos de aproximadamente -25 dBm), como en los canales 10 y 11, (aprox. -40 dBm); además, los canales que poseen picos bajos son los canales 3 y 4, que poseen valores de -50 dBm, y los canales 8 y 9, con valores de -60 dBm.

Por otro lado, si se analiza los valores promedios (en negro), podemos ver que los canales que presentan mayor potencia promedio son los canales 1 y 2, con un valor aproximado de -82 dBm, y los demás canales presentan una tendencia de valores que están por debajo de -88 dBm.

Estos valores bajos se deben a que no estuvieron totalmente activos en el horario de las mediciones.

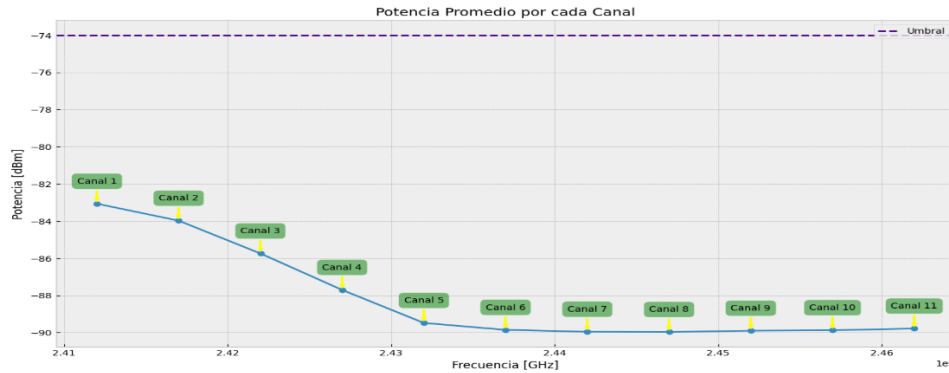


Figura 4.3 Gráfica de potencia promedio por cada canal vs frecuencia

La Figura 4.3 muestra la potencia promedio por cada canal, que se ha obtenido a partir de los datos acumulados en las mediciones durante los 3 días de la prueba. La gráfica señala que los canales del 1 al 4 fueron los que más actividad tuvieron, siendo el canal 1 el que mayor potencia promedio tuvo (-83 dBm), mientras que los canales de 5 a 11 tuvieron un nivel de potencia inferior a -89 dBm. Con estos datos, se obtuvo el espectro en donde la potencia es mayor es el canal 1, menor canal 8 e intermedio canal 4.

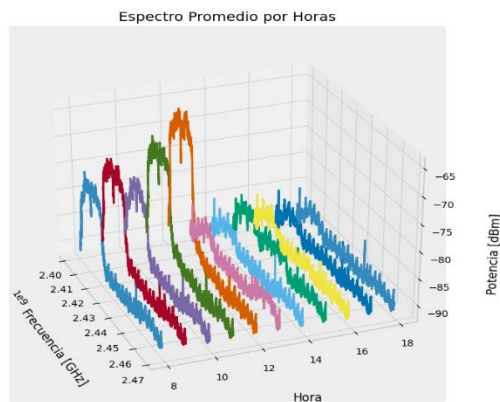


Figura 4.4 Gráfica del espectro por horas

En la gráfica del espectro por horas de la Figura 4.4, se puede observar cómo evoluciona el uso de la banda de 2,4 GHz con el tiempo. En el horario de 8 am a 12 pm existe un mayor uso del espectro, especialmente en los canales 1 y 2, presentando el máximo uso a las 12 pm.

4.1.3. Análisis en hora pico

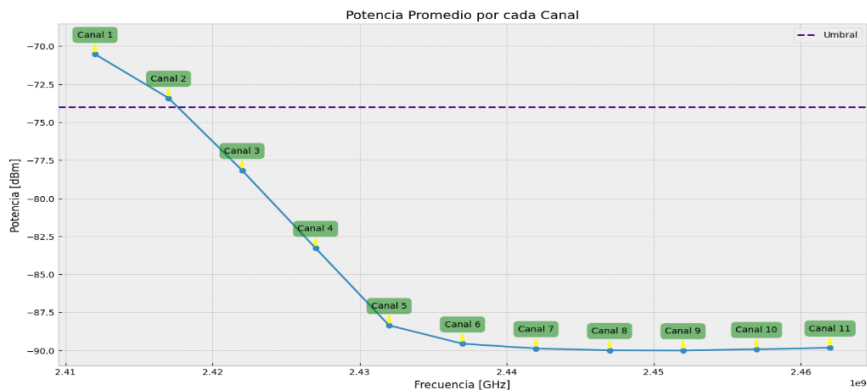


Figura 4.5 Potencia promedio por canal en el horario de 12 pm.

Se continúa analizando los datos obtenidos en el escenario de la oficina, dentro del segmento entre las 12 pm y la 12:59 pm. Se obtiene la Figura 4.5. Si se compara con la Figura 4.3, se tienen mayores valores numéricos. Esto es de esperarse, ya que no se está considerando los momentos de menor actividad, que reducirían el valor promedio. También se muestra el umbral de -74 dBm, que es la sensibilidad del equipo que se utiliza como punto de acceso inalámbrico, que solo superan los canales 1 y 2 (los de mayor actividad).

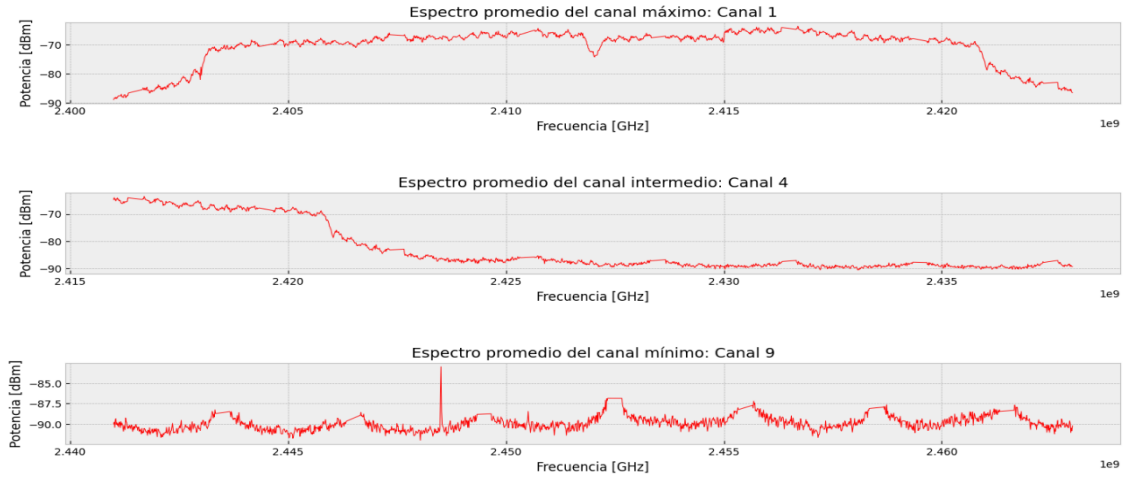


Figura 4.6 Espectro promedio de canal máximo, mínimo e intermedio en el horario de 12 pm.

En la Figura 4.6, se puede observar mejor el grado de actividad en el canal más ocupado, tanto por mayores valores numéricos como por la forma de meseta en el canal. El resto de los canales sigue teniendo el mismo aspecto que sus contrapartes en la Figura 4.3.

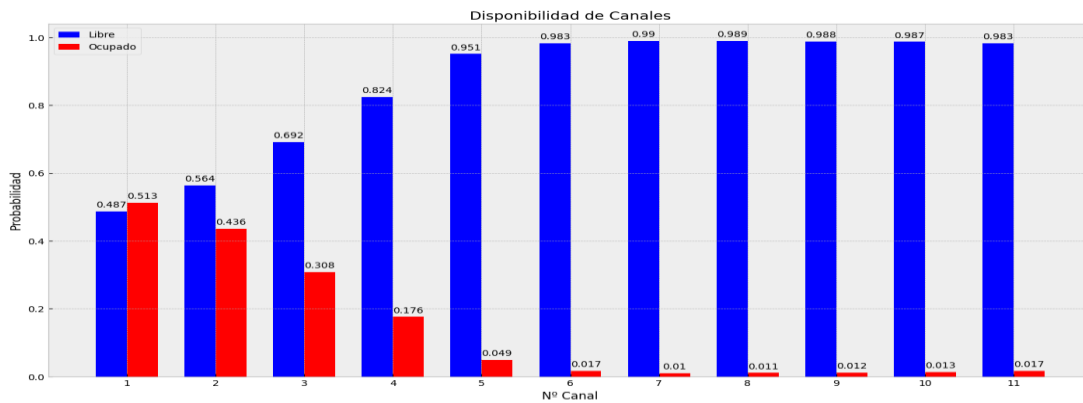


Figura 4.7 Disponibilidad de los canales en el horario de 12 pm.

Para la obtención de la disponibilidad, se toma la potencia de la frecuencia central de cada canal, que se compara con la sensibilidad del equipo. Si la potencia es mayor que la sensibilidad, el canal se considera ocupado; en caso contrario, se marca el canal como libre. La

Figura 4.7 resulta de realizar esa comparación con cada muestra tomada entre las 12 pm y la 12:59 pm. Se muestra que el canal 1 permanece ocupado la mayor parte del tiempo (51,3% del intervalo de medición), y que la ocupación es mínima en los canales del 6 en adelante (<1,7%). Esto significa que, en el primer canal, es muy probable hallar fuentes de interferencia que afecten a la comunicación, todo lo contrario, por ejemplo, al canal 7.

En la Figura 4.8 se muestra los valores de potencia máximo, mínimo y promedio en el cual se observa que existen canales que están por encima de la sensibilidad (-74 dBm).

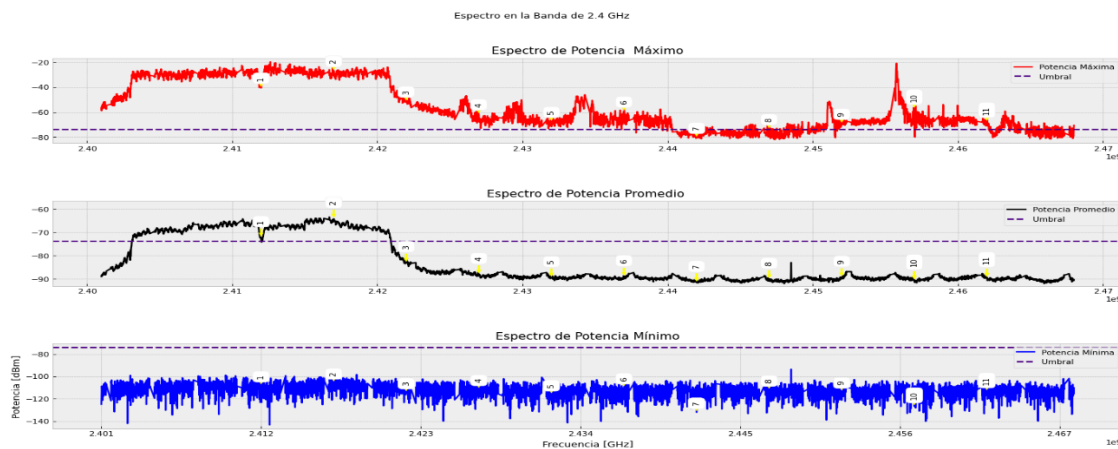


Figura 4.8 Espectro con valores máximos, mínimos y promedios en el horario de 12 pm.

4.2. Análisis de desempeño

El análisis de desempeño se desarrolla en el campus de la ESPOL, en una zona sin emisiones en la banda de 2,4 GHz.

4.2.1. Escenario



Figura 4.9 Ubicación de equipos en el escenario de trabajo.

La Figura 4.9 muestra los equipos distribuidos en un triángulo equilátero de 4 m de lado. La antena discono, el enrutador wifi (conectado a una fuente de poder auxiliar), y el estudiante con el analizador espectral y el teléfono móvil. La fase I de esta prueba es para mediciones sin interferencia, que utiliza un enrutador wifi Linksys EA6350 y un teléfono celular. La fase II toma mediciones con interferencia, con los mismos equipos de la fase I junto a una antena discono Sirio SD 3000 N, un analizador espectral Anritsu SM2713E y un generador de señales Agilent.

4.2.2. Análisis sin interferencia

Primero, antes de encender el enrutador, se toman 20 mediciones para determinar el piso de ruido. El enrutador se configuró para trabajar con canal 6 y un ancho de banda de 20 MHz. Se tomó 20 mediciones tanto con el teléfono como con el analizador, una cada minuto.

Se obtuvo un piso de ruido de $-72,26$ dBm. En las pruebas sin interferencia, se tuvo una potencia de señal máxima de $-49,81$ dBm, una tasa de bits promedio de $140,5$ Mbps y un valor medio de RSSI de $-43,15$ dBm.

4.2.1. Análisis con interferencia

El generador de señal se configuró a una frecuencia de 2437 MHz (la frecuencia central del canal 6) y una potencia inicial de -10 dBm. Se realizaron incrementos de 1 dB hasta alcanzar los 12 dBm. Por cada incremento, se tomaron 10 muestras con el teléfono y el analizador. Se encontró lo siguiente:

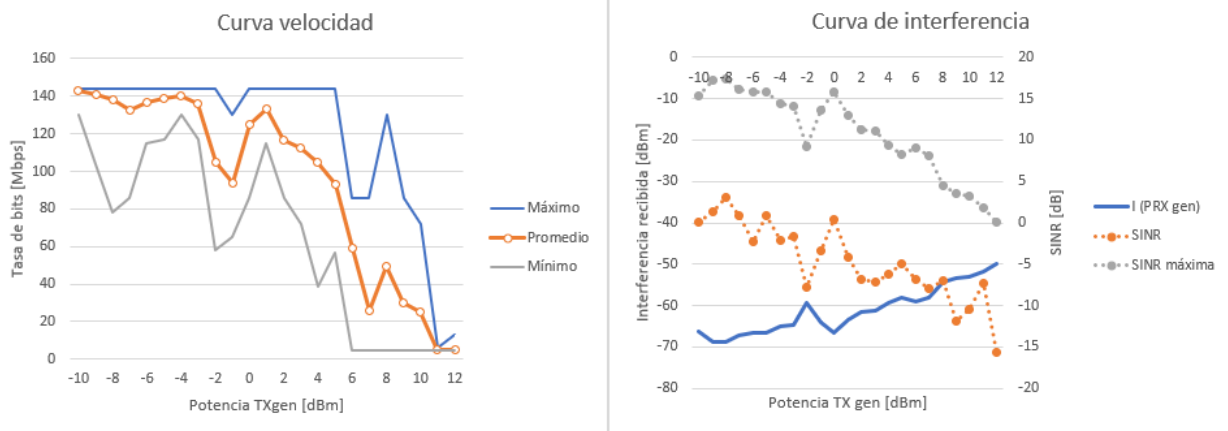


Figura 4.10 Gráficas en función de la potencia del generador de señal.

La gráfica izquierda de la Figura 4.10 muestra la tasa de bits máxima, media y mínima. La gráfica derecha muestra la potencia de interferencia (en dBm) y las SINR (en dB). Se encuentra que las velocidades del enlace se reducen a medida que se avanza en la prueba. Por ejemplo: con una potencia de transmisión de -10 dB, la velocidad promedio es de 143 Mbps, y se mantiene la modulación 64-QAM. No obstante, a 4 dB, la velocidad ya es de 105 Mbps y la modulación varía entre 64-QAM y QPSK. A 11 dB, se espera una velocidad de $5,15$ Mbps, y una

modulación CCK. Igualmente, la SINR se va reduciendo, hasta llegar a los 0 dB. La Figura 4.11, más abajo, muestra la relación entre tasa de bits y SINR observados.

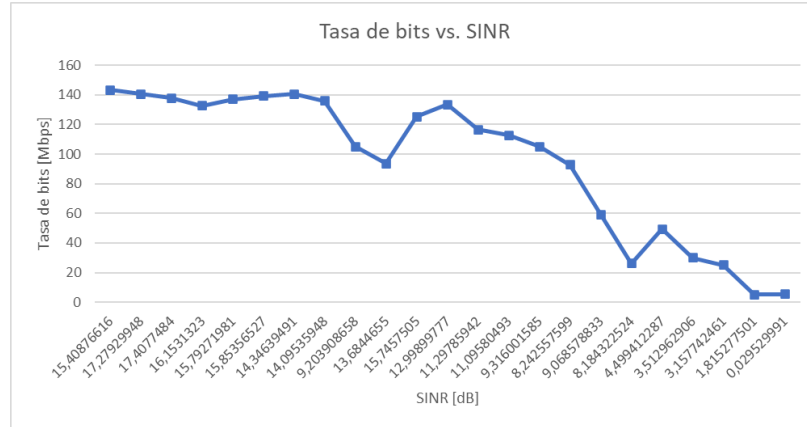


Figura 4.11 Gráfica de velocidad de enlace en función de la SINR calculada.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES

La prueba de desempeño permite inferir cuál puede ser el impacto de una señal interferente sobre una conexión inalámbrica, wifi en este caso. La prueba de interferencia permite obtener el grado de ocupación del espectro electromagnético dentro del centro de la ciudad, que se puede convertir en interferencia cuando se establece una conexión.

La prueba de interferencia mostró picos de hasta -25 dBm, y valores promedio de -70 dBm en la hora pico. En las pruebas, una interferencia de -60 dBm puede reducir la SINR a 15 dB, y causar reducciones leves o moderadas sobre el rendimiento del canal. Ya con -50 dBm, la SINR puede caer a 0 dB, y forzar al enlace a usar una tasa de bits mínima. No obstante, la señal invasora suele estar por los -70 dBm, un nivel que no causa una pérdida de calidad notable por sí solo.

A pesar de que los resultados indican que sigue siendo posible instalar nuevos sistemas en la banda de 2,4 GHz, es importante considerar que las distancias efectivas se reduzcan en un futuro cercano. Largas distancias y obstáculos en la conexión causarán un rendimiento menor al descrito en este estudio. Se recomienda que se continúe con estudios adicionales en las bandas de 2,4 y 5 GHz para tener información actualizada acerca del grado de congestión del espectro en la zona céntrica de Guayaquil y otras ciudades del Ecuador.

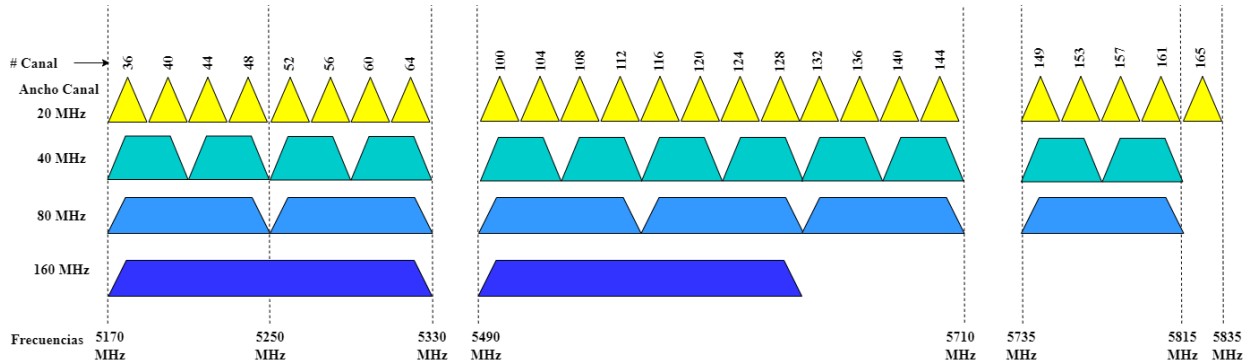
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, «PLAN NACIONAL DE FRECUENCIAS versión 6.0,» Junio 2021. [En línea]. Available: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf. [Último acceso: 12 06 2022].
- [2] Presidente Constitucional de la República, Ley Orgánica de Telecomunicaciones, 2015, 12 de febrero.
- [3] Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, «NORMA ESPECTRO USO LIBRE Y ESPECTRO PARA USO DETERMINADO EN BANDAS LIBRES,» 23 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2018/04/NORMA-ESPECTRO-DE-USO-LIBRE-Y-ESPECTRO-PARA-USO-DETERMINADO-EN-BANDAS-LIBRES.pdf>. [Último acceso: 2022 junio 22].
- [4] E. Khorov, A. Kiryanov, A. Lyakhov y G. Bianchi, «A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore,» 20 septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8468986>. [Último acceso: 22 junio 2022].
- [5] A. Vallejo, Artist, *Evaluación de Desempeño del Estándar IEEE 802.11N en un Ambiente de Laboratorio. Caso de Estudio Espe*. [Art]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2016.
- [6] S. Estrella, Artist, *Estudio y Análisis para la Actualización de Red WLAN de la SEPS Utilizando Tecnologías Basadas en el Estándar IEEE 802.11 AC*. [Art]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2017.
- [7] F. Sanguña, Artist, *Estudio Técnico de la Red de Comunicaciones para Brindar los Servicios de Voz, Internet y Video por Demanda de una Urbanización*. [Art]. EPN, 2010.
- [8] A. Frenzel, A. Carrasco, E. Monachesi y M. Chaile, «Física de las Ondas Radioeléctricas dentro del Estándar IEEE 802.11b,» Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, 2010.
- [9] D. Vargas, Artist, *Análisis Comparativo de Tecnologías para el Diseño De Red WLAN para el Laboratorio de Tecnologías de la Información y Comunicación de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica Del Ecuador Empleando Estándar 802.11N*. [Art]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2020.
- [10] R. Verdone y A. Zanella, *Pervasive Mobile and Ambient Wireless Communications*, Londres: Springer-Verlag London, 2012.

- [11] S. Haykin, *Digital Communication Systems*, 1st. ed., John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [12] M. Jakubowski , I. Dolińska y A. Masiukiewicz, «Comparación de interferencias en las bandas Wi-Fi de 2,4 GHz y 5 GHz,» *Conferencia internacional sobre tecnologías de la información y digitales (IDT) de 2017*, pp. 106-112, 2017.
- [13] K. Nakprasit y C. Phongcharoenpanich, «Investigation of Received Signal Strength of IEEE 802.11n WLAN in Coverage of Nakhon Ratchasima Rajabhat University,» *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 237-240, 2018.

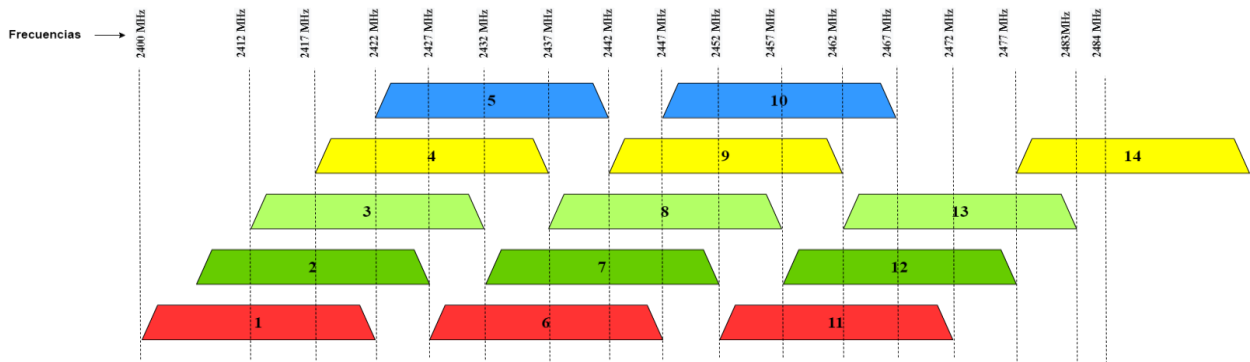
ANEXOS

Anexo 1 Canales en la banda de 5 GHz.



Nota: Se muestran los anchos de canal soportados por la norma 802.11ac.

Anexo 2 Canales de wifi en la banda de 2,4 GHz.



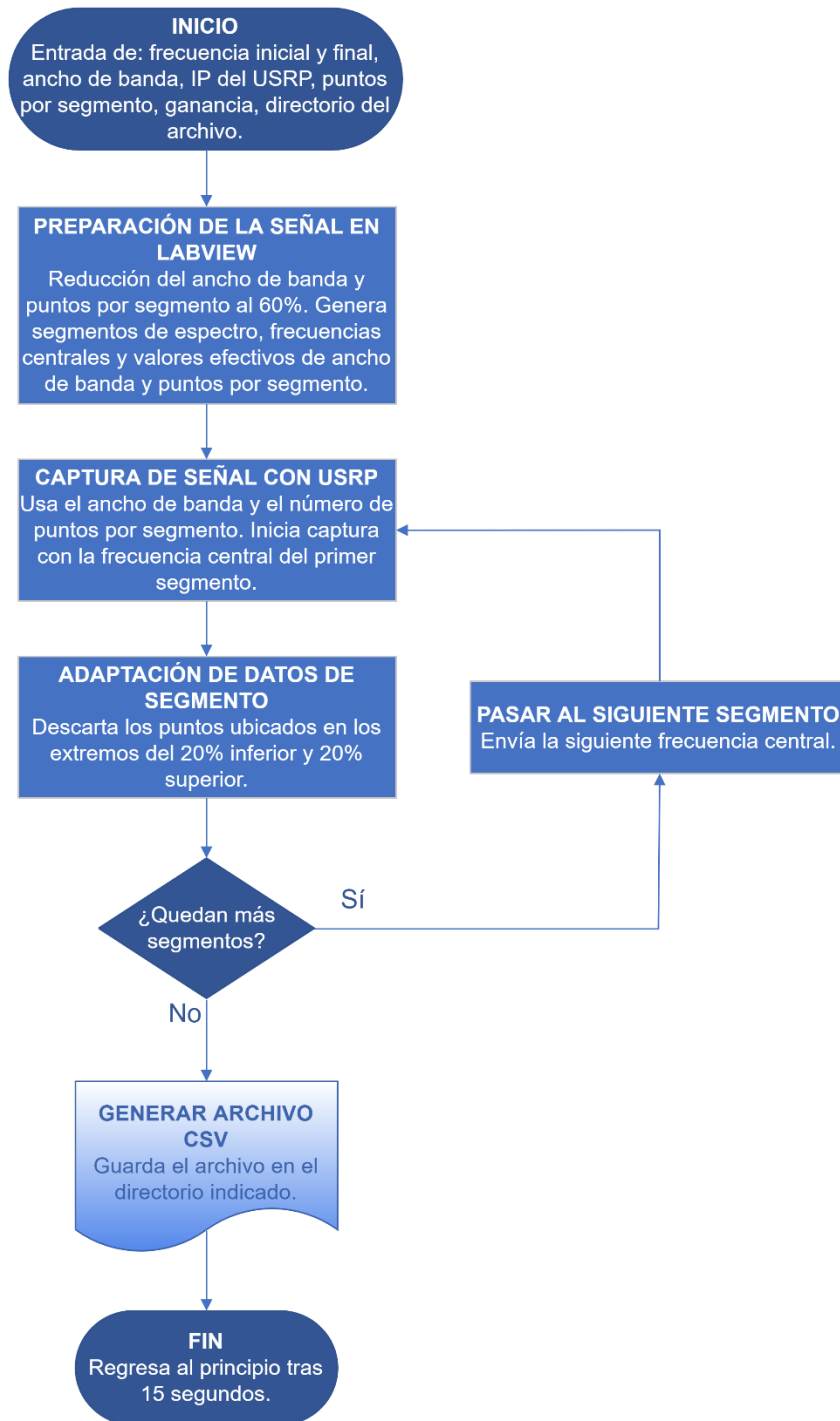
Nota: Se muestran los canales de 20 MHz soportados por la norma 802.11n.

Anexo 3 Configuración del sistema.

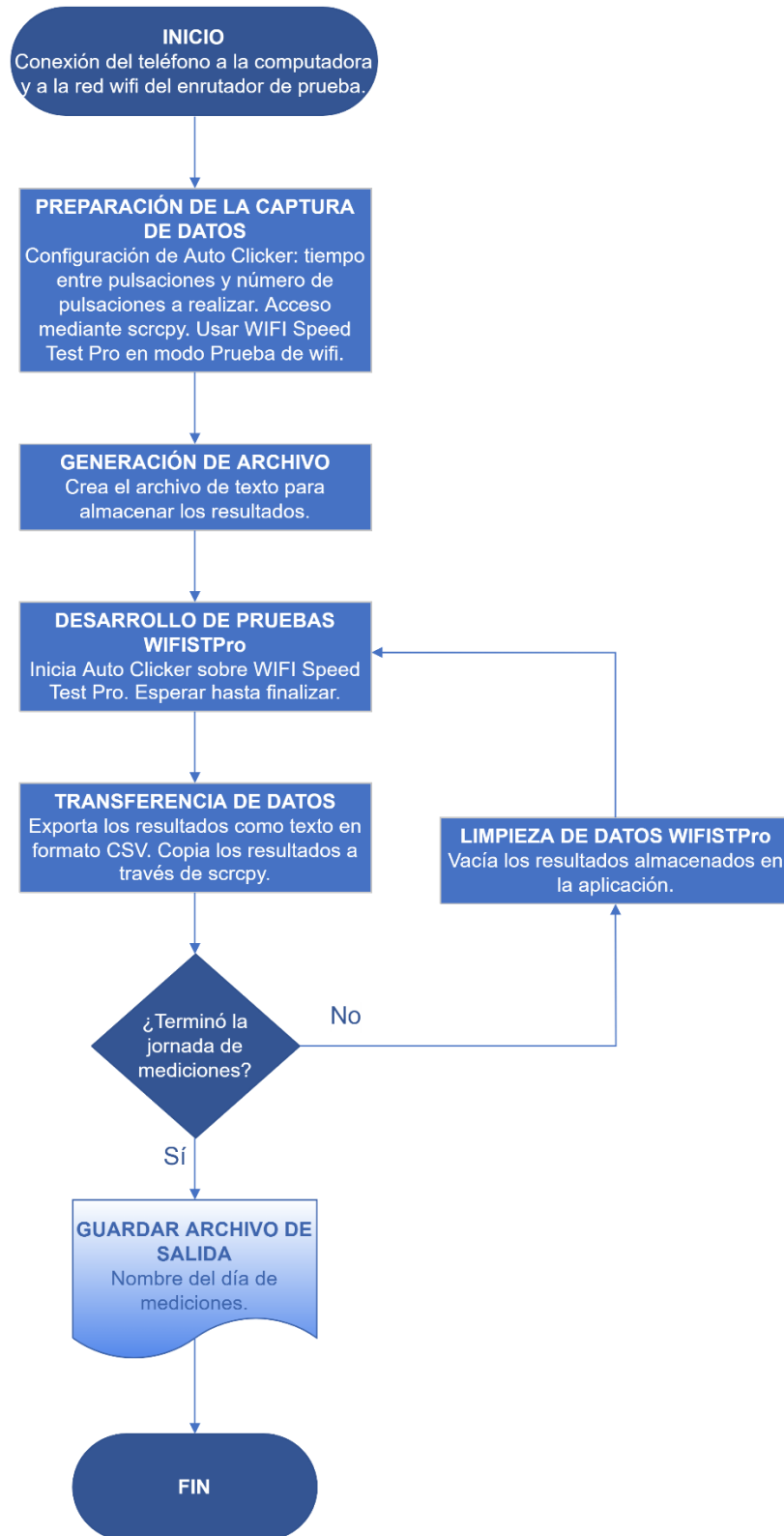
Parámetro	Valor
Frecuencia inicial	2400 MHz
Frecuencia final	2500 MHz
Ancho de banda	5 MHz
Ganancia	10 dB
Número de muestras	400

Los valores que se configuraron en el USRP N210 son los que se muestran en la tabla de este anexo, los cuales se debe ingresar como entrada para poder obtener las mediciones del espectro en la banda de 2.4 GHz.

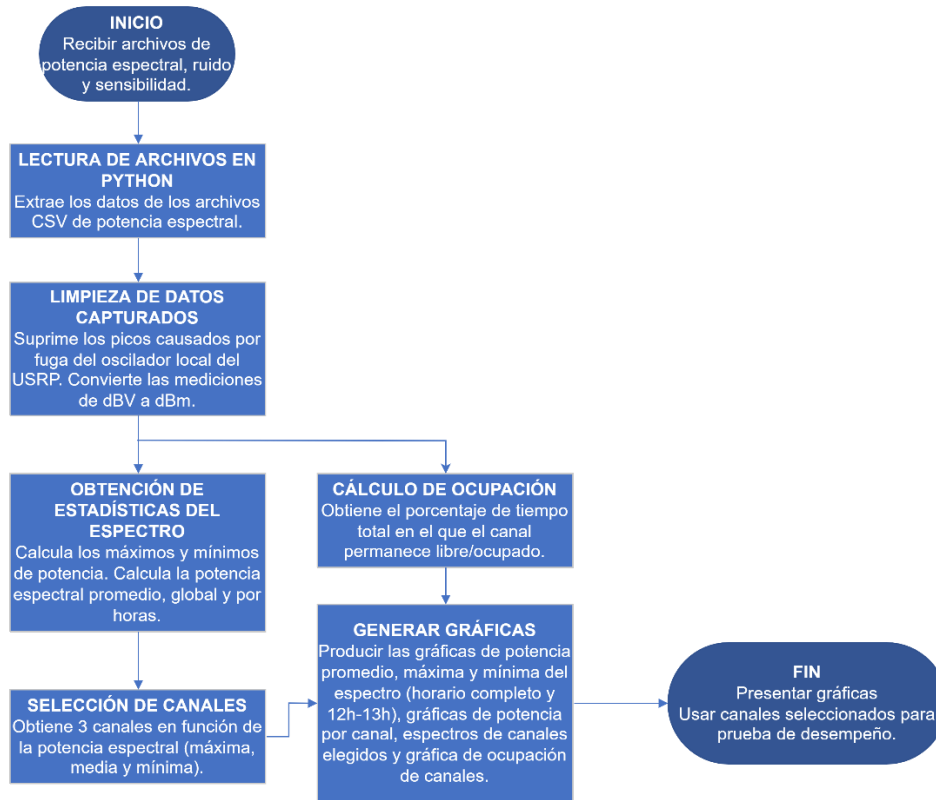
Anexo 4 Diagrama de flujo del programa de análisis espectral (LabVIEW)



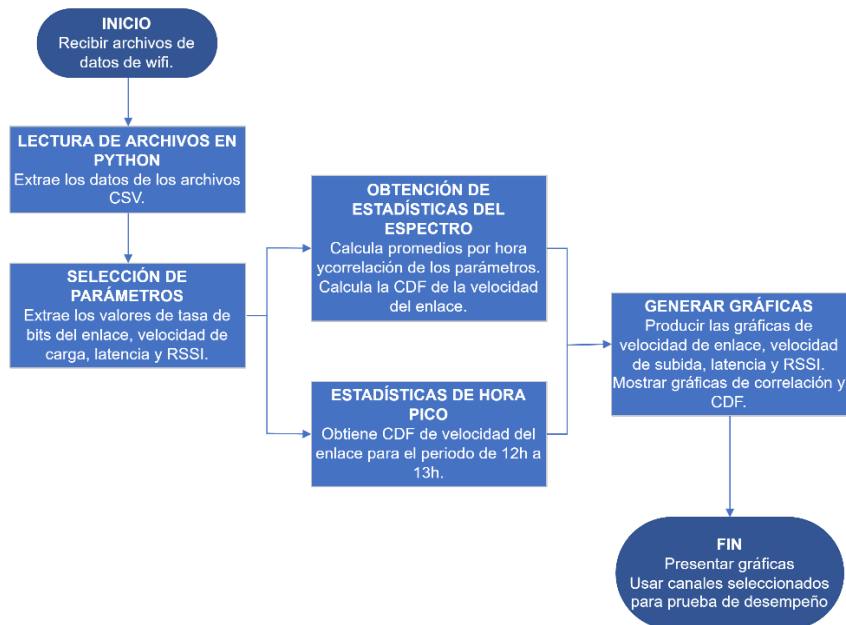
Anexo 5 Diagrama de flujo del proceso de prueba de desempeño



Anexo 6 Diagrama de flujo del programa de análisis de potencia espectral – Interferencia



Anexo 7 Diagrama de flujo del programa de análisis de datos – Desempeño



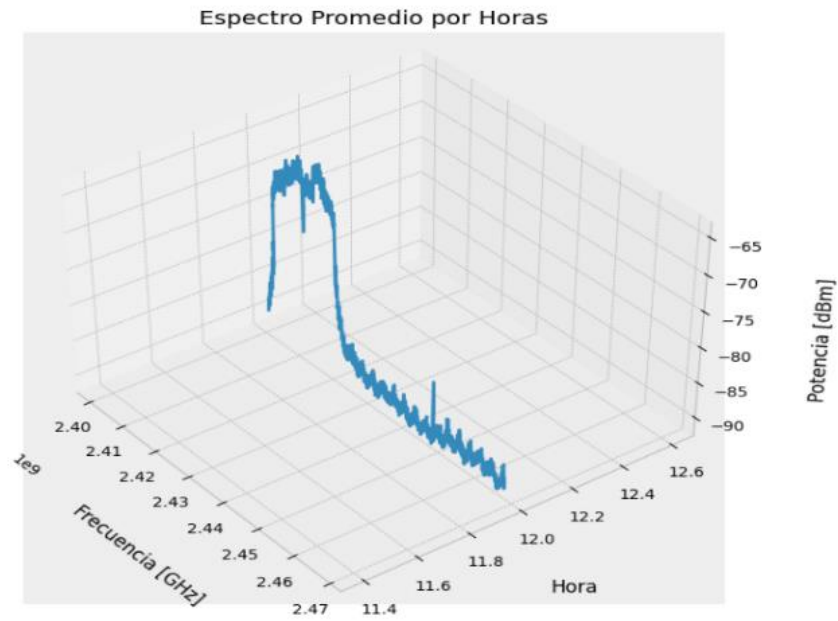
Anexo 8 Lugar de medición de ruido para los días 1 y 2



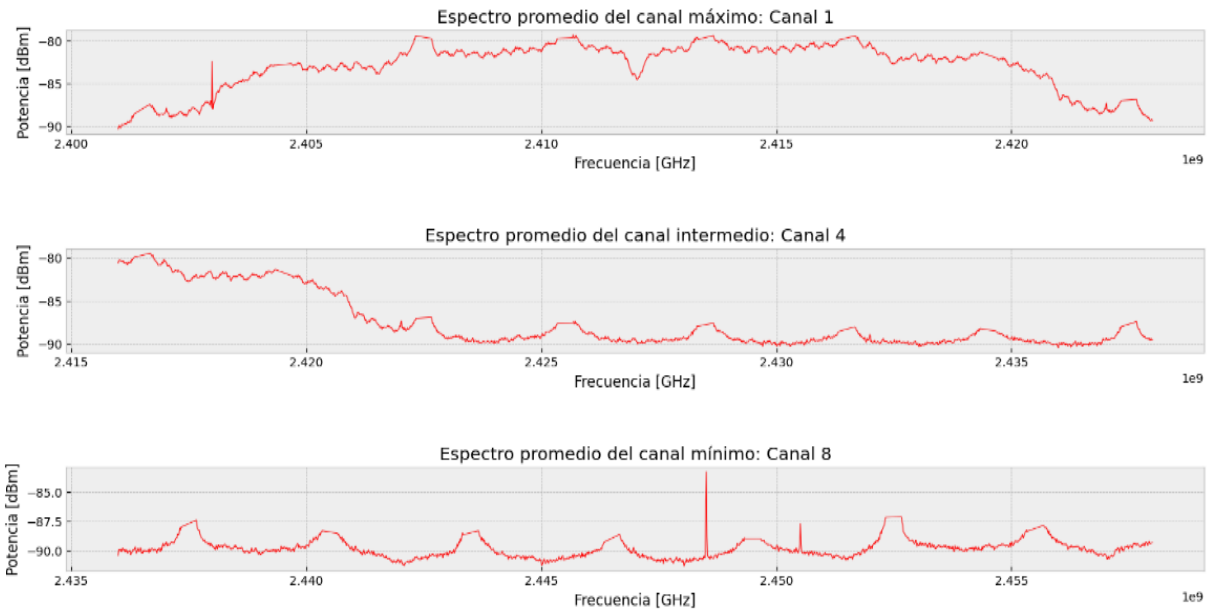
Anexo 9 Lugar de medición de ruido para el día 3



Anexo 10 Espectro promedio de la banda de 2,4 GHz en el horario de 12 pm.



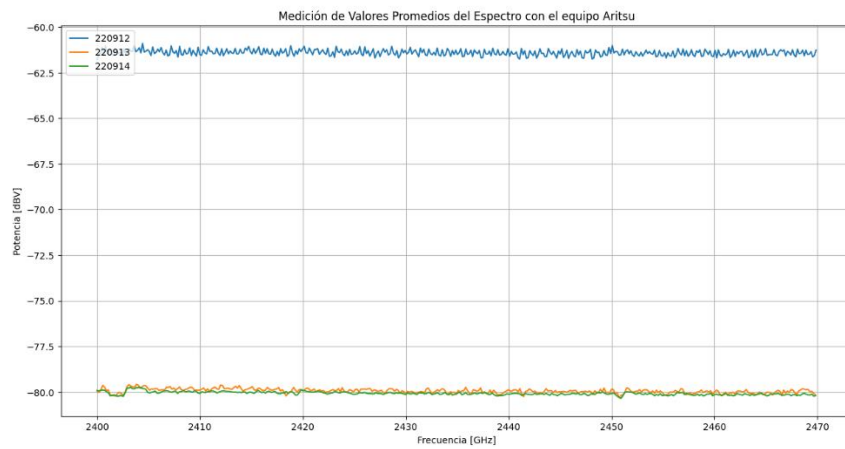
Anexo 11 Gráfica del espectro del canal mínimo, máximo e intermedio.



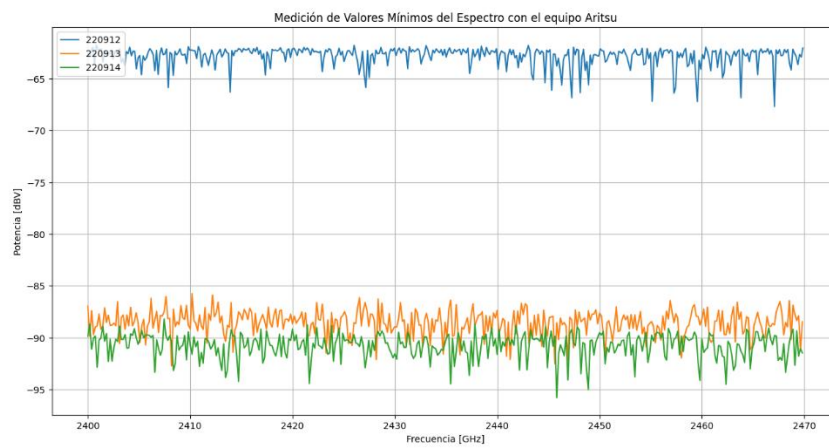
Anexo 12 Toma de mediciones del ruido de fondo con un analizador espectral Anritsu MS2732E



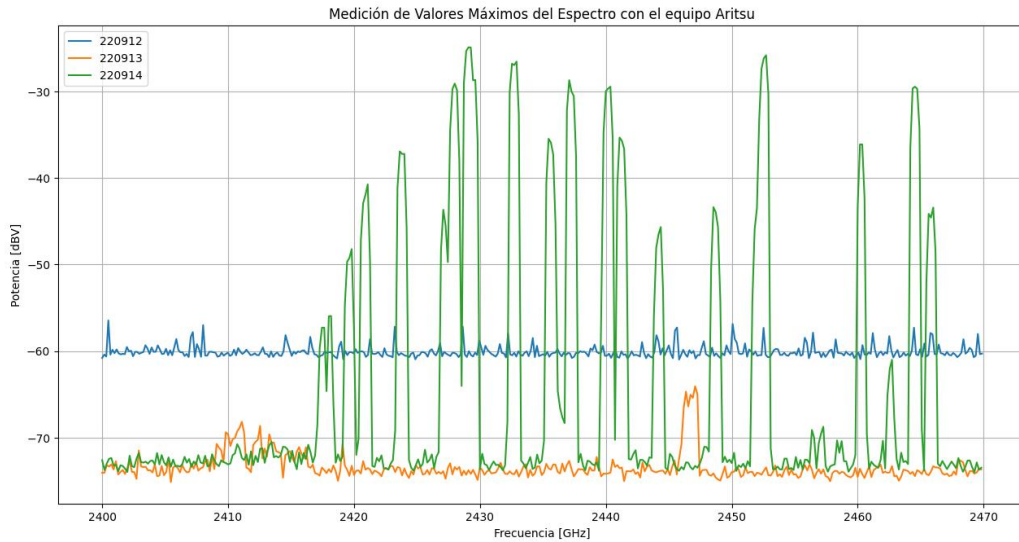
Anexo 13 Medición de valores promedio del ruido, gráficas por día de medición.



Anexo 14 Medición de valores mínimos de ruido, gráficas por día.



Anexo 15 Medición de valores máximos de ruido, graficado por día.



Los picos más elevados son causados por AP de vehículos que pasaron cerca del lugar de medición.

Anexo 16 Medición en ESPOL

Se realizó una medición en el campus Gustavo Galindo de la ESPOL. Los equipos se instalaron en el laboratorio de radiocomunicaciones de la FIEC, en jornadas donde no había clases o prácticas. Se hizo uso del equipamiento usado en la prueba de congestión para obtener datos del espectro que puedan usarse para contrastar diferencias entre el escenario urbano y el escenario de la universidad.

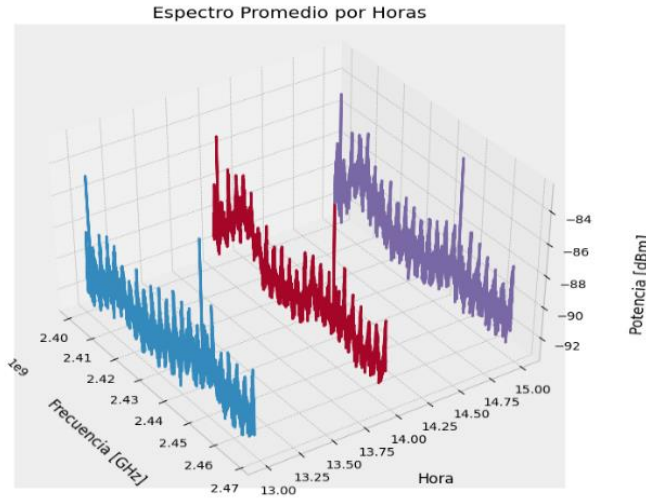


Figura A: Gráfica del espectro por horas en ESPOL.

Esta medición se realizó por tres horas para poder observar el espectro. La Figura A muestra la potencia espectral en la banda de 2,4 GHz dividida por horas. El valor máximo de potencia promedio llega a -80 dBm. En estos niveles, el filtrado de picos del oscilador local no llega a realizar una supresión completa, lo que genera una gráfica de aspecto dentado.

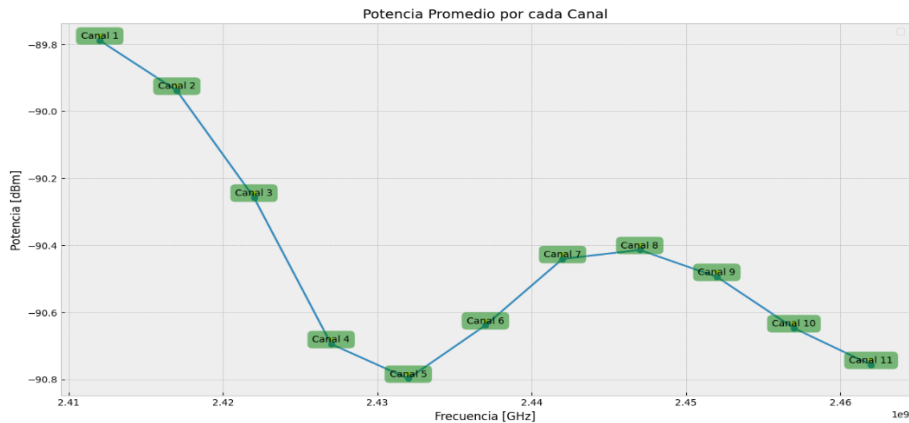


Figura B: Gráfica de potencia promedio por canal en ESPOL

En la gráfica de la Figura B, se encuentran niveles más bajos en el campus que en la oficina. Al igual que en el escenario original, los valores están por debajo de la sensibilidad del

enrutador. Sin embargo, los valores son aún más bajos debido a una actividad notablemente menor.

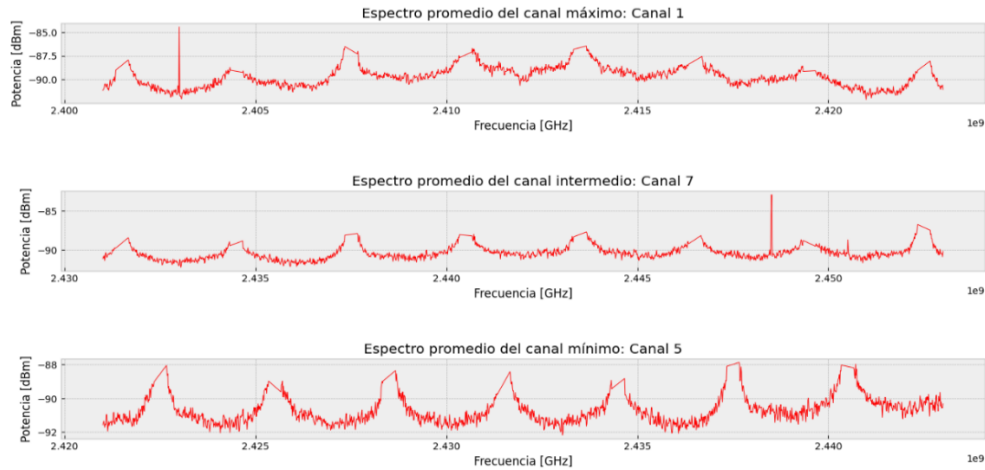


Figura C: Gráfica del espectro del canal mínimo, máximo e intermedio en ESPOL.

Con la gráfica de la Figura C, se separaron los canales 1, 5 y 7 como canales de análisis.

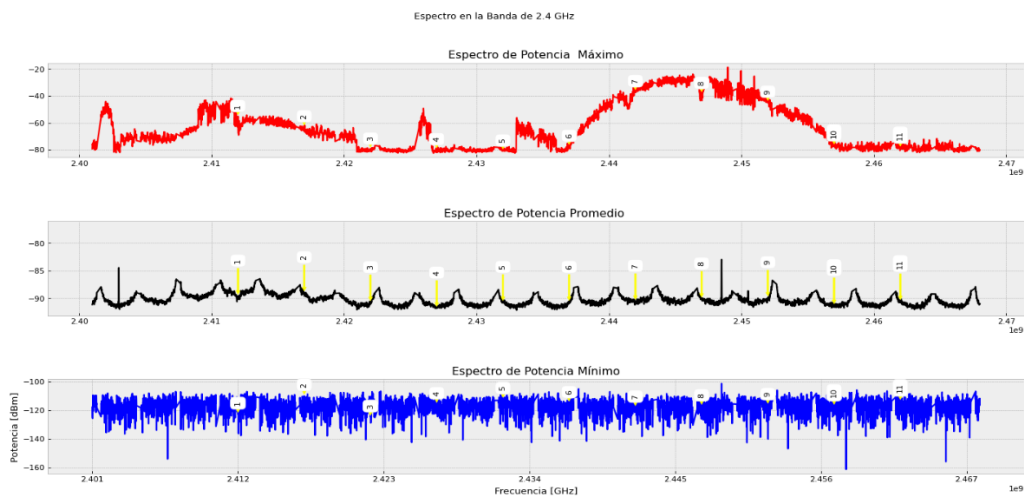
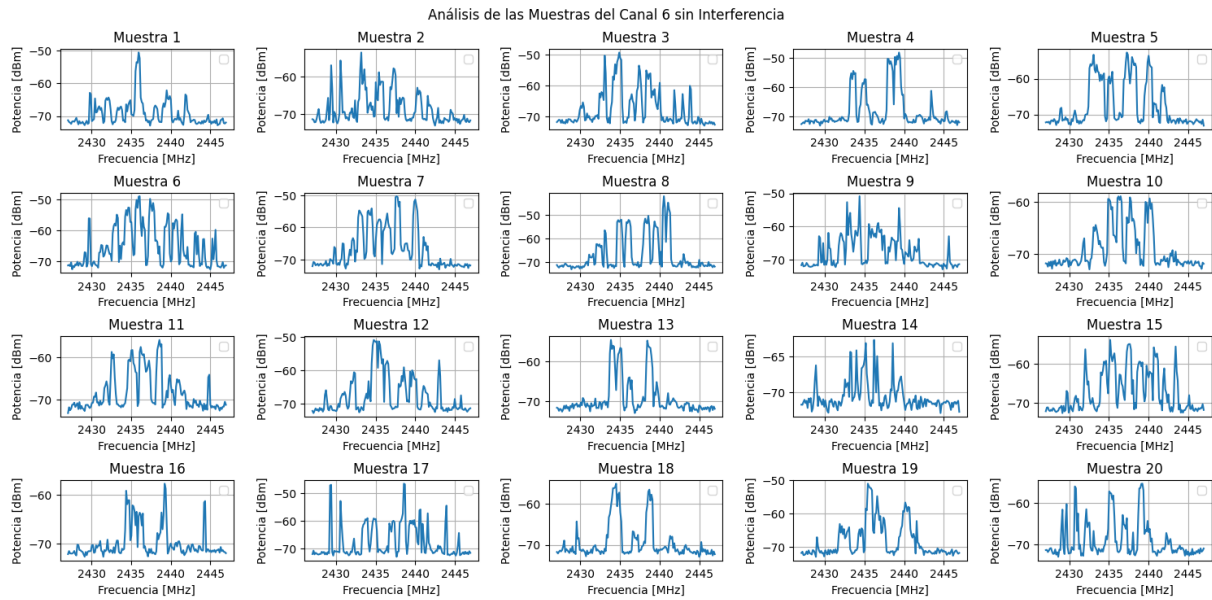


Figura D: Espectro de potencia promedio en ESPOL.

La Figura D muestra la potencia máxima, mínima y promedio del espectro en toda la banda de 2,4 GHz de las mediciones realizadas en el Laboratorio de radiocomunicaciones de ESPOL.

Anexo 17 Análisis de las Muestras sin Interferencia



Anexo 18 Análisis de las Muestras con Interferencia

