



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“MEDICIÓN Y MODELAMIENTO DEL RANGO DE
FRECUENCIAS ASIGNADO A RADIODIFUSIÓN FM DE LA BANDA
VHF (88-108 MHZ) DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN
ESCENARIO INTERIOR DE UN EDIFICIO EN EL CENTRO
DE GUAYAQUIL.”

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

JOHAN MANUEL MARTÍNEZ BUCHELI

JOSÉ LUIS MORÁN LAVAYEN

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2016

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradecemos a Dios por habernos permitido llegar al final de esta etapa de nuestras vidas, a nuestros padres por el apoyo incondicional durante nuestra carrera universitaria, a profesores que fueron una guía fundamental en el aprendizaje de nuevos conocimientos y a nuestros compañeros por darnos esa ayuda en momentos difíciles.

DEDICATORIA

A toda mi familia y especialmente a mis padres Ingrid Bucheli y Manuel Martínez por ser el pilar fundamental en mi carrera universitaria, además de brindarme todos sus consejos y experiencias.

Johan Manuel Martínez Bucheli

Esta tesis va dedicada a todas esas personas que confiaron en mí, principalmente a mis padres Dayse Lavayen y José Morán por el total apoyo en mi carrera universitaria, amigos y profesores que nos orientaron en cada momento para poder llegar al final de esta etapa.

José Luis Morán Lavayen

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Jorge Gómez Mag.

PROFESOR EVALUADOR

.....
Francisco Novillo Ph.D.

PROFESOR EVALUADOR

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me (nos) corresponde exclusivamente; y doy (damos) mi (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"

.....
Johan Martínez Bucheli

.....
José Morán Lavayen

RESUMEN

En la actualidad, el espectro radioeléctrico se ha visto afectado por la gran demanda de dispositivos inteligentes así como de otras tecnologías inalámbricas, debido a que existe una determinada cantidad de ancho de banda para cada servicio de telecomunicaciones.

Una de estas tecnologías es 4G-LTE, la cual necesita un mayor ancho de banda que sus predecesores a fin de obtener un mejor servicio con mayor calidad y cobertura. Por este motivo el organismo regulador CONATEL (ARCOTEL) reasignó la banda de 700 MHz a la operadora CNT para brindar este servicio.

Por lo tanto el espectro es un recurso escaso donde cada día es complicado hallar bandas libres para la introducción de nuevos sistemas, básicamente en las bandas que están por debajo de los 3 GHz, que es favorable para los sistemas inalámbricos por su característica de propagación. En este contexto, diversos organismos a nivel mundial han desarrollado estudios para solventar el uso ineficiente del espectro radioeléctrico, con el fin de proporcionar espacios libres y darle un mejor uso a estas bandas espectrales [1]. Uno de los organismos antes mencionado fue la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC). La FCC demostró que la mayor parte del espectro licenciado está siendo infrutilizado, donde se observan variaciones del rango de utilización. Es decir, mientras cierta parte del tiempo el espectro es altamente utilizado, en otras permanecen casi sin uso. [2]

Consecuentemente los demás organismos comenzaron a estudiar la necesidad de incluir reformas, no solo para renovar su utilización sino para tratar de suministrar nuevo espectro disponible a aplicaciones.

En la actualidad, los sistemas de comunicación se ven afectados en la implementación de nuevas aplicaciones, no solo por el poco espectro disponible, sino por la calidad de señal receptada por los usuarios. Debido a esto en las zonas céntricas de una ciudad donde existen grandes concentraciones de usuarios y edificios, provocan una cantidad de señal muy baja en la cual el espectro se encuentra saturado casi en su totalidad.

Por tal motivo, en este proyecto se desea cuantificar la disponibilidad de espectro en la banda de FM en una zona urbana, para así poder mitigar y reducir la problemática de escasez de frecuencia.

Para esto se realizará el estudio de la disponibilidad de canales en la banda de radiodifusión FM en escenario interior de un edificio en la ciudad de Guayaquil, donde se capturaran los niveles de potencia en 3 lugares del edificio: planta baja, media y alta; durante 7 días en cada planta.

Al final se determinó que en la planta baja existe un mayor grado de disponibilidad con respecto a la planta media y alta. De acuerdo al gráfico de potencia se escogió 2 canales para hacer el análisis de disponibilidad, donde se especifica una disponibilidad del 90.63 % de tiempo lo que corresponde a 400 KHz de frecuencia disponible.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	iv
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL.....	viii
CAPÍTULO 1	1
1. USO INEFICIENTE DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Descripción del Problema	2
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivos General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
1.5 Metodología	5
1.6 Alcance	6

CAPÍTULO 2.....	7
2. FUNDAMENTACION TEORICA	7
2.1 Sistema y Topología de Radiodifusión FM.....	7
2.2 Espectro Analógico de la Señal FM.....	9
2.3 Norma Técnica de Radiodifusión FM en Ecuador.....	10
2.4 Servicio de Radiodifusión FM.....	11
2.5 Estado del Arte	12
2.5.1 Acceso Dinámico al Espectro	12
2.5.2 Acceso Oportunista al Espectro	14
2.5.3 Radio Cognitiva	17
2.5.4 White Spaces.....	18
2.5.5 Estudios sobre FM.....	20

CAPÍTULO 3.....	22
3. METODOLOGIA Y MODELAMIENTO	22
3.1 Escenario de Estudio y Metodología.....	22
3.2 Descripción de la Medición.....	23
3.3 Algoritmo para la Medición de la Señal.....	25
3.4 Modelo Estocástico.....	27
CAPÍTULO 4.....	30
4. RESULTADOS DEL ESTUDIO.....	30
4.1 Localización Geográfica.....	30
4.2 Parámetros de Configuración.....	32
4.3 Resultados de la Medición.....	33
4.4 Ajuste Estadístico de los Resultados.....	43

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Topología de FM.....	7
Figura 2.2 Canal de FM.....	9
Figura 2.3 Señal de Audio.....	9
Figura 2.4 Taxonomía del DSA.....	13
Figura 2.5 Esquema de Detección de Energía.....	14
Figura 2.6 Esquema de Control de Detección.....	16
Figura 2.7 Agujeros de Espectro de Frecuencia.....	19
Figura 3.1 Escenario de Estudio.....	22
Figura 3.2 Equipo de Medición.....	23
Figura 3.3 Asignación de banda FM.....	25
Figura 3.4 Diagrama ASM del Algoritmo de Medición.....	26
Figura 4.1 Localización del Escenario.....	30
Figura 4.2 Edificio San Francisco 300.....	31
Figura 4.3 Perfil de Elevación.....	31
Figura 4.4 Niveles de potencia de la banda FM (primer piso).....	35
Figura 4.5 Niveles de potencia de la banda FM (planta media).....	36
Figura 4.6 Niveles de potencia de la banda FM (planta alta).....	37
Figura 4.7 Disponibilidad de canales en la banda FM (planta baja).....	39
Figura 4.8: Histograma del canal 12 en planta media.....	42
Figura 4.9: Histograma del canal 12 en planta alta.....	43
Figura 4.10: Histograma del canal 26 en planta media.....	43
Figura 4.11: Histograma del canal 26 en planta alta.....	44

Figura 4.12: Número de canales con disponibilidad instantánea.....	45
Figura 4.13: Modelamiento estadístico del canal 36 en la banda FM.....	46
Figura 4.14: Modelamiento estadístico del canal 38 de la banda FM.....	47
Figura 4.15: Modelamiento estadístico del canal 43 de la banda FM.....	48
Figura 4.16: Modelamiento de la disponibilidad de canales-Parte 1.....	49
Figura 4.17: Modelamiento de la disponibilidad de canales -Parte 2.....	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de canales Libres y Ocupados en el territorio Ecuatoriano.....	3
Tabla 2. Norma técnica de radiodifusión FM.....	10
Tabla 3. Relaciones de protección.....	11
Tabla 4. Valores de potencia FM.....	11
Tabla 5. Parámetros de Configuración.....	32
Tabla 6. Emisoras de radio concesionadas en la provincia del Guayas.....	53
Tabla 7. Provincias con al menos 1 estación radial FM.....	54
Tabla 8. Disponibilidad Instantánea (Planta Baja).....	57
Tabla 9. Prueba Kolmogorov Smirnov con confiabilidad del 99.9%.....	58
Tabla 10. Prueba Kolmogorov Smirnov con confiabilidad del 99.9%.....	58
Tabla 11. Prueba Kolmogorov Smirnov con confiabilidad del 99.9%.....	58

CAPÍTULO 1

1. USO INEFICIENTE DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.

1.1 Antecedentes.

En el Ecuador la radio tiene un origen importante, teniendo en cuenta que fue un riobambeño el fundador de la primera estación de radio. En esa ocasión se usó un transistor de 25W en transformador y 5 Watios en antena que operaba en 60 metros para las emisiones, las cuales se realizaban durante varios días por 5 horas diarias. Las primeras radios en el Ecuador eran: Radio el Prado en Riobamba, Radio Zenit de Guayaquil y Radio Quito. La radiodifusión para esa época no existían leyes que la regularan, únicamente se establecía una identificación; así por ejemplo a Sudamérica se le designaba la letra S y al Ecuador la letra E. [3]

A medida de regular las bandas de radiodifusión la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) encargada de la regulación de telecomunicaciones internacionales, concede en 1941, la radiodifusión FM en la banda de 42-50 MHz.

En ese mismo año se anuncia el Decreto Ejecutivo N°325 con el primer Reglamento de Instalaciones Radioeléctricas en el Ecuador. En 1971, Ecuador es el país con el mayor número de emisoras en el mundo, con un total de 250 para 6 millones de habitantes. En agosto de 1982 se crea la Superintendencia de Telecomunicaciones como organismo de control y monitoreo del espectro radioeléctrico de los operadores que emplean servicios de telecomunicaciones. En el 2009 el Consejo Nacional de Radio y Televisión (CONARTEL) cierra sus puertas y da paso al Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL). [3]

1.2 Descripción del Problema.

En la actualidad se puede observar que la cantidad de dispositivos electrónicos que hacen uso del internet es muy grande y está provocando un uso excesivo de comunicaciones inalámbricas.

Se han realizado muchos análisis e investigaciones, donde se presenta que en los próximos años se va tener un considerable aumento del tráfico móvil [4]. Este hecho conlleva a un escaso uso del espectro radioeléctrico, el cual se necesitará para las comunicaciones inalámbricas. Por tal motivo, es necesario hallar la forma más óptima para hacer más eficiente la utilización del espectro. [1]

El espectro radioeléctrico ha sido asignado en su totalidad, así como la TV, radio, redes Wi-Fi, celulares transmiten en ciertas frecuencias para evitar interferencias con otras. Por tal motivo dichas empresas de comunicación están preocupadas por la poca cantidad de espectro disponible, lo que ocasionaría malestar a los usuarios e impediría en la innovación de nuevas tecnología. .

En el Ecuador se debe tener en consideración cuanta frecuencia no está siendo utilizada especialmente en FM ya que este sistema de radiodifusión es el de mayor acoge en el país. Es por eso que la mayoría de radiodifusores y concesionarios de FM hacen que la banda en las ciudades grandes este saturada, expuesto en [5].

Actualmente en el país existe gran cantidad de frecuencia libre al menos en FM, y como se lo ha expuesto anteriormente hay un alto número de concesionarios, es necesario realizar el respectivo análisis para que se pueda llegar a un fin en concreto en la radiodifusión FM en el Ecuador. En la Tabla 1 se observa la cantidad de canales FM en las diferentes provincias del país. [5]

PROVINCIAS	FM	
	Libres	Ocupadas
Azuay	9	41
Bolívar	36	14
Cañar	33	17
Carchi	18	32
Chimborazo	20	30
Cotopaxi	33	17
El Oro	5	45
Esmeraldas	15	35
Galápagos	41	9
Guayas	0	56
Imbabura	17	33
Loja	17	33
Los Ríos	14	36
Manabí	0	50
Morona S.	33	17
Napo	33	17
Orellana	33	17
Pastaza	36	14
Pichincha	0	50
Sucumbíos	20	30
Tungurahua	9	41
Zamora CH.	37	13

Tabla 1. Distribución de canales Libres y Ocupados en el territorio Ecuatoriano.

En la Tabla 1, se determina que en las provincias: Pichincha, Guayas y Manabí la radiodifusión FM ya se encuentra saturado. En estas provincias se debe emplear nuevas reformas para la concesión de estaciones FM.

1.3 Justificación.

Para este proyecto lo más relevante es buscar la manera idónea de cómo mejorar el uso ineficiente del espectro radioeléctrico, por lo que a medida que se incrementen nuevos dispositivos inteligentes, resulta difícil atender con éxito la creciente demanda de usuarios por un mayor ancho de banda. [4]

Las redes inalámbricas han causado el uso excesivo del espectro radioeléctrico. Sin embargo muchos estudios han demostrado que en las zonas externas de la cobertura, el espectro es subutilizado y en gran parte se debe a los organismos de regulación de telecomunicaciones que poseen estrictas normas de asignación de las bandas de frecuencias. El espectro radioeléctrico es efectivamente un recurso natural escaso. No obstante, nos encontramos que gran parte de las bandas de frecuencias licenciadas tienen muy bajo tráfico y en determinados momentos totalmente nulo. Esto provoca que otros segmentos se vean sobreexplotados y por tanto congestionados.

Una solución para la problemática de subutilización del espectro, es la técnica de Acceso Dinámico al Espectro (DSA), en la cual, ayuda a cada usuario acceder dinámicamente al espectro de forma temporal, donde todo usuario licenciado puede compartir a los usuarios no licenciados una parte de su canal de frecuencia que no está siendo utilizado temporalmente.[2]

Es necesario encontrar espacios en blancos en el espectro radioeléctrico, para otorgar mayor capacidad de datos en los sistemas de comunicación, a causa de que el tráfico de datos en los próximos 5 años se incrementara casi 10 veces. [4]

Para esto, se procede a analizar la banda 88-108 MHz que corresponde a radiodifusión FM, donde se va a determinar la disponibilidad de canales del espectro.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar la disponibilidad de canales en la banda de radiodifusión FM (88-108 MHz) en escenario interior del edificio San Francisco 300.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar los datos de potencia de los canales de la banda FM
- Calcular el estado y disponibilidad de los canales de la banda de radiodifusión FM.
- Modelar estadísticamente la disponibilidad que existe en la banda de radiofrecuencia FM.

1.5 Metodología.

Las mediciones del estudio se realizaron dentro de un edificio en el centro de la ciudad de Guayaquil. La Metodología se basa en tomar datos de la señal de potencia de los canales de la banda de radiodifusión FM con un dispositivo programable de radio y con la herramienta de software se captura la señal. Después se analiza los datos con un programa de software para graficar los niveles de potencia, disponibilidad y función de distribución acumulada, así definir el modelo estadístico de ciertos canales de la banda y calcular el porcentaje de disponibilidad de canales en la banda de frecuencia de 88- 108 MHz.

Por lo tanto con los resultados, se puede saber los canales de frecuencia que estén libres para poder colocar otro servicio o sistema de comunicación.

La medición se realizará en 3 sesiones: primero se ubica en la planta alta del edificio de 22 pisos, donde se debe esperar un lapso de 7 días, para obtener un aproximado de 35.000 muestras de los niveles de potencia. Después se dirige con el equipo a la mitad del edificio, en la cual es el piso 11, donde se capturan las respectivas muestras. Por último se dirige a la planta baja del edificio, para realizar las respectivas mediciones, donde se concluye que la intensidad de la señal de potencia en la planta baja será menor a la planta alta.

Por último, se obtiene una matriz con las muestras de los 50 canales de la banda FM en un archivo, donde se analizará los gráficos del espectro de potencia, se calculará el estado de detección con el umbral asignado y así determinar un modelo estadístico para conocer la disponibilidad del espectro.

1.6 Alcance.

Los beneficios del presente proyecto son amplios; por ejemplo, los resultados de disponibilidad de canales de la banda FM, se podría otorgar al administrador del edificio del escenario de estudio para implementar nuevos sistemas de comunicación inalámbrica en los canales disponibles.

Vincular el sistema de detección de canal llamado Acceso Dinámico del Espectro (DSA), en la asignación de bandas de frecuencia, para que usuarios licenciados y no licenciados puedan funcionar conjuntamente y emplear de forma eficiente el espectro radioeléctrico en la banda de radiodifusión FM.

Con el estudio, se podrán encontrar white spaces en la banda de radiodifusión FM para solventar el ineficiente uso del espectro, ya que la banda FM esta descongestionada y así aprovechar el escaso espectro.

El organismo regulador de telecomunicaciones ARCOTEL podría realizar estudios más sofisticados para la implementación de sistemas de acceso oportunista al espectro, en los canales que tengan disponibilidad en la banda FM.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

Dado los objetivos del proyecto planteado y el alcance que se espera, es necesario conocer cierta fundamentación teórica de los sistemas de radiodifusión FM, junto con algunos estudios de modelamiento espectral que se han realizado en los últimos años. Por tal motivo, el siguiente capítulo se divide en dos partes, la primera parte consiste en explicar cómo se estructura un sistema de radiodifusión FM, las respectivas normas que se rigen en el Ecuador, la cantidad de emisoras existente en el Ecuador. Por último muestra los estudios realizados de modelamiento espectral para tomar en consideración en este proyecto.

2.1 Sistema y Topología de Radiodifusión FM.

Los componentes de una estación para el servicio de radiodifusión FM son los siguientes: transmisor, línea de transmisión, sistema radiante, equipo de control master y equipos de enlace. Ver Figura 2.1.

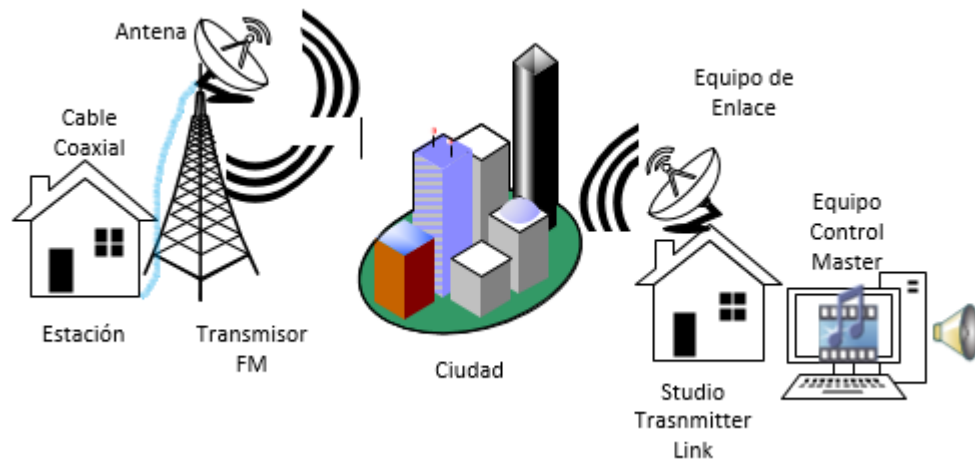


Figura 2.1: Topología de FM

Transmisor.- El circuito electrónico del equipo debe ajustarse a los parámetros y características técnicas autorizadas y deben contar con instrumentos de medición. El transmisor FM cuenta con: oscilador para crear la portadora de alta frecuencia, un modulador para la modulación en frecuencia de la señal mensaje

y portadora, un amplificador RF para aumentar la potencia de la señal, por último la señal se irradia en la antena. [6]

Las estaciones de radiodifusión FM no pueden cubrir dos o más zona de operación con un solo transmisor, por lo cual usan repetidoras para aumentar la cobertura.

En el exterior físico de la torre que soporta el transmisor y sistema radiante, debe tener la identificación de la estación FM.

Las instalaciones de transmisores y radiodifusiones en las zonas adyacentes a los aeropuertos, deben efectuar la norma y regulación de la Dirección de Aviación Civil dentro de zonas de protección y seguridad.

Línea de Transmisión.- Se utiliza una guía de onda o cable coaxial para la antena, con lo cual se disminuyen las pérdidas de potencia entre el transmisor y la antena.

Sistema Radiante.- Es el conjunto de antenas para la transmisión de la señal, que se están dirigidas para irradiar a sectores de la población de acuerdo a su autorización de cobertura. [6]

Las antenas del sistema se deben ubicar a 36 metros de altura máxima, sobre la altura promedio de superficie, para certificar la calidad del servicio.

Equipos de Control Máster y Producción.- El concesionario puede elegir los sistemas de estudios con total libertad, para configurar o instalar el control máster y los demás equipos para la actividad de la estación.

Equipos de Enlace.- Las antenas, transmisores y receptores de enlace se deben ajustar a los parámetros autorizados que certifiquen el servicio sin generar interferencias [6].

2.2 Espectro Analógico de la señal FM.

La señal analógica o máscara FM se muestra en la Figura 2.2.

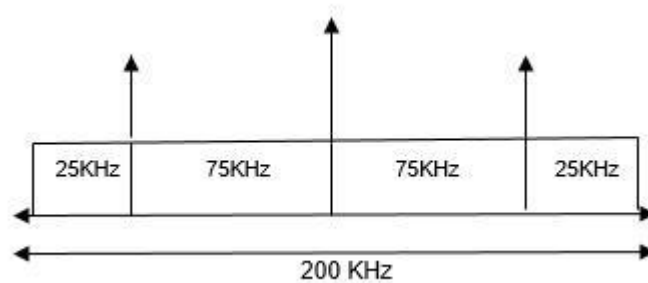


Figura 2.2: Canal de FM.

La banda FM se encuentra entre 88-108 MHz, tiene 25 KHz como bandas de seguridad en ambos extremos, lo que limita a usar 150 KHz con un total de 200 KHz. [7]

En la transmisión estereofónica FM se emplea una señal multiplex por encima de la portadora que se forma de la siguiente manera:

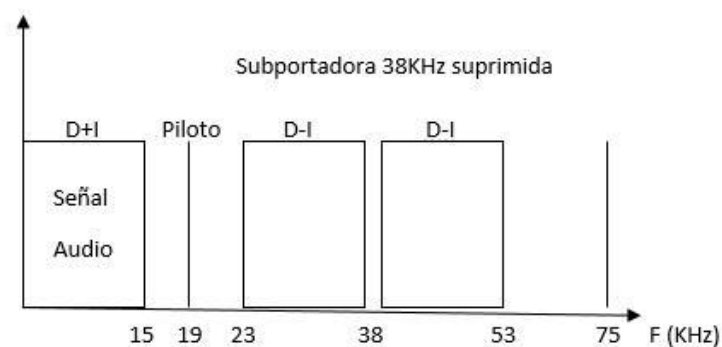


Figura 2.3: Señal de audio

La señal de audio tiene un ancho de banda de 30 Hz a 15 KHz, es la suma D+I; después viene la señal piloto en 19KHz, a continuación se encuentra la señal D-I que es la banda lateral, la banda inferior inicia en 23 KHz y la banda superior

termina en los 53 KHz; en la mitad de la banda lateral, es decir, 38 KHz se ubica la subportadora que está suprimida en la transmisión pero es reconstruida en el receptor. Ver Figura 2.3. [8]

2.3 Norma Técnica de Radiodifusión FM en Ecuador.

La Norma técnica de Radiodifusión FM designado por el organismo de regulación CONATEL, establece lo siguiente: bandas de frecuencias, canalización, asignación de frecuencias para el funcionamiento de estaciones en el servicio de radiodifusión FM en el Ecuador. [6]

En Tabla 2 se muestra la norma técnica de radiodifusión FM.

Banda de Frecuencias	Canalización de Bandas	Grupo de Frecuencias	Intensidad de Campo
88-108 MHz	100 canales Separación de 200 KHz	G1,G2,G3 G4 con 17 frecuencias G5 y G6 con 16 frecuencias Separación de 1200 KHz	Área de cobertura Principal ≥ 54 dB μ V/m Secundaria ≥ 50 dB μ V/m y < 54 dB μ V/m

Tabla 2. Norma técnica de radiodifusión FM.

En la Tabla 3, se muestra la relaciones de protección señal deseada / señal no deseada. Donde la distancia mínima entre emisoras transmisoras deben cumplir las relaciones de protección para co-canal y canal adyacente en el área de cobertura. [6]

Separación de Portadoras	Sistema Estereofónico
0 KHz	37 dB
200 KHz	0 dB
400 KHz	-20 dB
600 KHz	-30 dB

Tabla 3. Relaciones de protección

2.4 Servicio de Radiodifusión FM.

El servicio de radiodifusión se crea con una estación matriz y repetidoras para transmitir la información de forma simultánea. Se usa comúnmente en las zonas urbanas, contrario a la radiodifusión en AM que se utiliza en zonas rurales; la cobertura de la radiodifusión en FM depende de la señal de propagación por línea de vista. [3]

La potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) de un transmisor FM no debe superar el valor de 16 [KW], ver en Tabla 4.

Valores de potencia del transmisor en radiodifusión FM.

Potencia del Transmisor (KW)	Ganancia Máxima de la antena (dB)
1	12
2	9
4	6
8	3
16	0

Tabla 4. Valores de Potencia FM [3]

Existe un total de 925 estaciones de radiodifusión FM en toda la región nacional, lo que provoca una congestión del espectro en las grandes ciudades como: Quito y Guayaquil. [3]

La ciudad de Guayaquil, cuenta con muchas emisoras radiales en FM; iniciando en frecuencia 88.1 MHz (Radio María) y termina en frecuencia 107.3 MHz (Rumba Networks), con un total de 49 estaciones FM. [9]

Existe un canal libre en la banda de radiodifusión FM, que va desde 102.5 hasta 103.3 MHz, son 200 KHz de espacios en blancos o exactamente un dial de frecuencia en 102.9 MHz no asignado a ningún concesionario.

Hay un grupo de estaciones radiales que trabajan muy cercano a su dial de frecuencia, con una separación de 200 KHz entre canal adyacente, son las siguientes: 93.3 - 93.5 - 93.7 - 93.9 - 94.1 MHz.

Existe un protocolo de comunicaciones llamado Radio Data System (RDS), que permite enviar pequeños datos digitales en la señal analógica de una emisora de radio FM, tipo de datos como: identificación de la emisora, tipo de programa, radio texto, entre otras [10]. Por ejemplo, una emisora local en la ciudad de Guayaquil, radio Rumba Network (107.3 MHz) presenta en el receptor de un automóvil, el nombre de la emisora.

2.5 Estado del Arte

2.5.1 Acceso Dinámico del Espectro

El primordial objetivo de la tecnología DSA (Acceso Dinámico al Espectro), reside en respaldar a los usuarios licenciados (usuarios autorizados que tienen asignado una banda del espectro) en seguridad contra la interferencia que pudieran originar los usuarios no licenciados (usuarios con prioridad baja de acceso al espectro). Una de las características del DSA. Por ejemplo, es el uso óptimo de un canal por parte del usuario no licenciado, siempre y cuando no interfieran al usuario licenciado. [11]

El acceso dinámico al espectro posee una variedad de estrategias y se categorizan en tres modelos como son: Uso de Modelo Exclusivo Dinámico, Modelo de Partición Abierta, Acceso de Modelo Jerárquico como se aprecia en la Figura 2.5. Dentro del modelo exclusivo el planteamiento principal es incluir elasticidad para una eficiente mejora del espectro, en la cual se desarrollan dos enfoques: los derechos de propiedad del espectro y la asignación del espectro dinámico. [12]

En el modelo jerárquico la idea principal es usar espectro licenciado para usuarios no licenciados, al mismo tiempo que se limita la interferencia del usuario primario (con licencia). En este modelo se desarrollan dos enfoques: Spectrum Underlay (por debajo del espectro), Spectrum Overlay (superposición de espectro) o se lo conoce como acceso oportunista al espectro (OSA). [12]

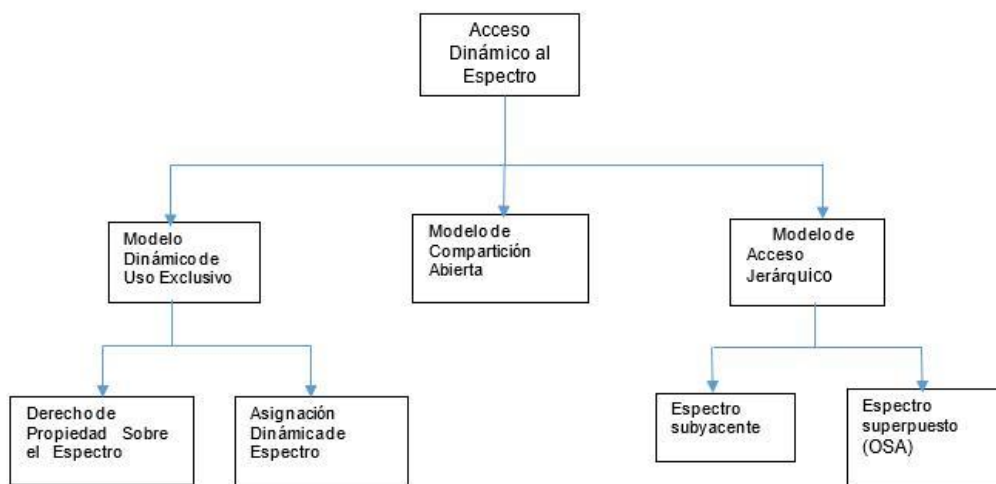


Figura 2.4: Taxonomía del DSA

2.5.2 Acceso Oportunista al Espectro

El Acceso Oportunista al Espectro (OSA) permite a los usuarios no licenciados acceder de oportunidad y sin ninguna interferencia a los canales de frecuencia que no están siendo usados por los usuarios licenciados, durante un cierto periodo de tiempo.

La tarea principal es identificar los espacios temporales del espectro que no son ocupados por los usuarios licenciados, conocidos como White Spaces, donde el usuario no licenciado funciona de manera oportuna y dejaría libre el canal tan rápido como regresara el usuario licenciado. [13]

OSA con detección de Energía.- El detector de energía es óptimo para detectar la señal desconocida si se percibe la potencia de ruido. En la detección de energía, usuarios CR (radio cognitiva) detectan la presencia o ausencia de los PU (usuarios primarios) basado en la energía de las señales recibidas. [14]

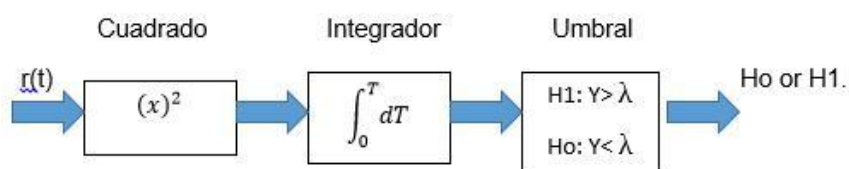


Figura 2.5: Esquema de detección de energía

Como se muestra en la Figura 2.6, la señal medida $r(t)$ se eleva al cuadrado y se integra sobre el intervalo T de observación. Finalmente, la salida del integrador se compara con un umbral λ para decidir si un PU está presente.

Mientras que el detector de energía es fácil de implementar, tiene varias deficiencias. El detector de energía requiere de $(1 / \text{SNR}^2)$ muestras para una probabilidad de detección. [14]

Por lo tanto, si los usuarios CR necesitan detectar señales débiles PU (SNR: -10 dB a -40 dB), la detección de energía ya sufre en tiempo de detección en comparación con la detección filtro adaptado.

Además, puesto que la detección de energía depende únicamente en la SNR de la señal recibida, su rendimiento es susceptible a la incertidumbre en la potencia de ruido.

Si la potencia de ruido es incierta, el detector de energía no será capaz de detectar la señal de forma fiable como el SNR es menor que un cierto umbral, llamado pared SNR. Además, el detector de energía sólo puede determinar la presencia de la señal pero no puede diferenciar los tipos de señales.

Así, el detector de energía a menudo resulta en la detección falsa desencadenada por las señales CR no deseadas. Por estas razones, con el fin de utilizar la detección de energía, CRAHNS (cognitive radio ad hoc networks) necesita proporcionar la sincronización sobre las operaciones de detección de todos los vecinos, es decir, cada usuario CR debe sincronizarse con la misma detección y transmisión horaria. De lo contrario, los usuarios de CR no puede distinguir las señales recibidas desde la primaria y usuarios CR, por lo tanto las operaciones de detección del usuario CR será interferido por las transmisiones de sus vecinos. [15]

Control de detección.- El principal objetivo de la detección del espectro es encontrar más oportunidades de acceso al espectro sin interferir con redes primarias. Con este fin, las operaciones de detección de Usuarios CR son controlados y coordinados por un controlador de detección, que considera dos cuestiones principales: con cuánto tiempo y frecuencia los usuarios CR deben sentir el espectro para lograr la suficiente precisión de detección dentro de la

banda (in-band) de detección, y la rapidez con CR usuario puede encontrar la banda del espectro disponible fuera de banda (out-band) de detección, que se resumen en la Figura 2.7.

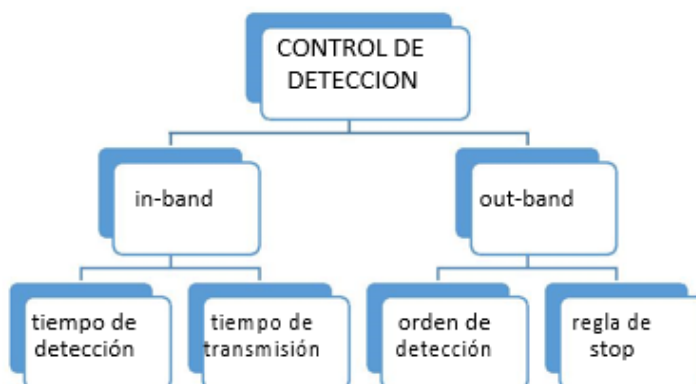


Figura 2.7: Esquema de control de detección

La detección de energía es una simple forma de localizar espacios en el espectro, por su mínimo esfuerzo de implementación [13]. Considerando que la señal que se recibe es de la forma:

$$y(n) = x(n) + r \quad (2.1)$$

En la ecuación 2.1, $x(n)$ es la señal objetivo, $r(n)$ es el ruido blanco gaussiano y n es el número de muestra.

La detección de energía se identifica con la variable M , que es la suma de la señal detectada y cumple la siguiente forma:

$$M = \sum_{n=1}^N |y(n)|^2 \quad (2.2)$$

Se debe notar que $|y(n)|^2$ es una serie de variables aleatorias independientes y distribuidas de forma idéntica con media μ y varianza σ^2 .

Cuando N es grande, usando el teorema del límite central, la métrica de detección M puede ser aproximada como una variable aleatoria gaussiana con media $\mu M = N \cdot \mu$ y varianza $\sigma M^2 = N \cdot \sigma^2$.

Nótese que $x(n) = 0$ cuando no hay transmisión del usuario primario. De esta forma se asume que un usuario primario transmite en una banda específica cuando M supera un umbral específico λ .

Con respecto a estas dos hipótesis, se generan la probabilidad de detección PD y la probabilidad de falsa alarma PF . La probabilidad PD equivale a decidir acertadamente que existe un usuario, es decir:

$$PD = P(M > \lambda |) \quad (2.3)$$

La probabilidad de falsa alarma PF es la probabilidad de perder oportunidades de uso espectral, dado que M excede el umbral λ , cuando no existen transmisiones de usuarios primarios, es decir:

$$PF = P(M < \lambda |) \quad (2.4)$$

La señal de potencia que se captura en una detección de energía se compara con un umbral que depende del ruido, por lo tanto elegir el umbral correcto es complicado y resulta en la debilidad de esta técnica.

2.5.3 Radio Cognitiva

La radio cognitiva debe adaptarse rápidamente a los sistemas de radiocomunicación a través del Acceso Dinámico al Espectro, tiene como característica que los usuarios no licenciados tengan una posibilidad de acceso a las bandas licenciadas, por lo que deben ajustarse de manera eficaz y en tiempo real a las fluctuaciones del tráfico de las redes inalámbricas. [15]

La radio cognitiva es un nuevo paradigma dentro de los sistemas de radiocomunicación y especialmente en la comunicación inalámbrica donde un dispositivo inteligente capta los canales del espectro que están siendo utilizados y también los canales no utilizados mediante un radio definido por software.

Esto es importante porque mantiene eficiente el uso del espectro radioeléctrico y al mismo tiempo tiene la casualidad de reducir la interferencia entre usuarios. [16]

La radio cognitiva funciona de una manera especial, donde las redes o nodos inalámbricos cambian sus parámetros de transmisión como: banda de frecuencia, modulación, codificación, entre otros; mediante la configuración por software para no interferir con los usuarios licenciados.

Para ejecutar este sistema se deben observar ciertos factores del entorno de la red como: banda de radiofrecuencia, conducta del usuario y estado de la red.

2.5.4 White Spaces

La demanda del escaso ancho de banda inalámbrico es ahora una tendencia fuertemente en auge, la Comisión Federal de Comunicación (FCC) ha llevado a cabo iniciativas para desalojar espacios en blanco del infrutilizado espectro en la emisión de TV para dispositivos móviles. [17]

La radio cognitiva y tecnología inalámbricas cada vez más sofisticados están empezando a hacer posible que los dispositivos inalámbricos sin licencia puedan tomar ventaja del espectro infrutilizado sin interferir con los usuarios licenciados existentes.

El ancho de banda debe ser reutilizado, solo una fracción del ancho de banda es reservada para la emisión de TV y es usado actualmente. Por ejemplo, en Austin-Texas existen 8 canales de alta potencia de los cuales 6 funcionan con espacios en blanco. [17]

Cada canal usa 6 MHz en ancho de banda para un total de 36 MHz, dando disponibilidad a 150 MHz del espectro que podría usarse para sistemas inalámbricos.

Los White Spaces son bandas de frecuencias entre libres y ocupadas (con licencia) de los canales de difusión del espectro radioeléctrico.

Por razones técnicas se asignan espacios en blanco entre bandas o entre canales adyacentes para evitar interferencia destructiva, además hay espacio no utilizado en el espectro radioeléctrico o que se está dejando disponible debido a la transición de lo analógico al digital en la TV abierta.

Por algún periodo de tiempo, casi gran cantidad de canales de frecuencia está disponible, a esto denominamos espacios en blancos (White Spaces), es decir son el resultado del uso ineficiente del espectro.

Es ideal que el organismo regulador y las normas que lo rigen cambien la forma de asignación de espectro de frecuencia para las nuevas tecnologías. Ver Figura 2.8

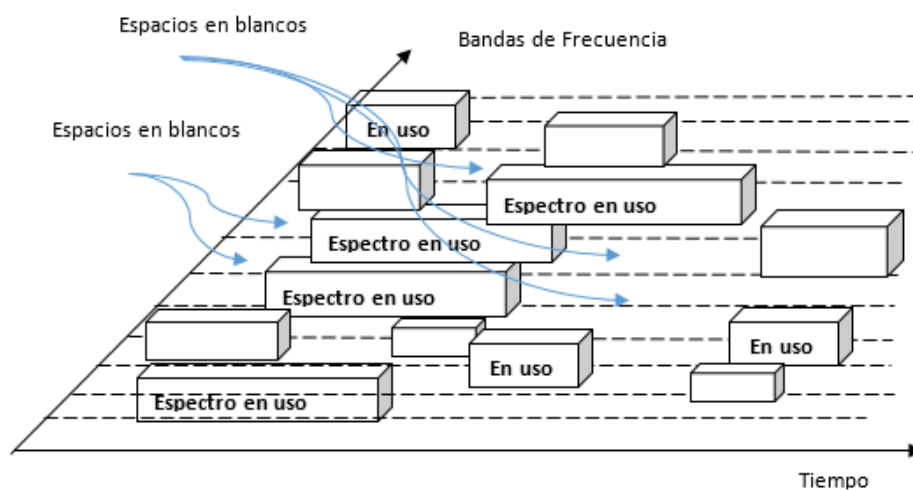


Figura 2.7. Agujeros de espectro de frecuencia

Las telefonías móviles en los últimos años han desarrollado nuevas estrategias para brindar mayor velocidad de transmisión en sus servicios, por lo tanto se debe adquirir mayor ancho de banda en el espectro.

Un estudio hecho en EEUU da a conocer que alrededor de la cuarta parte de las familias poseen dispositivos móviles inteligentes, en la cual tendría conexiones en cualquier parte del mundo y es así como están pasando los años y la tecnología móvil va alcanzando un 51 por ciento [18]. Mientras esta demanda por adquirir nuevos dispositivos este en alza, los proveedores de los servicios móviles verán su presión por mejorar va a ir en aumento. Ahora podemos decir que muchos usuarios no ven el mejor momento para adquirir nuevos dispositivos uno más avanzado que otro. Además algunos estudios realizados informan que alrededor del 60 por ciento de los usuarios encuestados dijo que la probabilidad de mejorar su actual dispositivo por uno mucho más avanzado es alta. [18]

2.5.5 Estudios sobre White Spaces

Hace varios años en el Reino Unido la OFCOM hizo un estudio para reformar las ondas de radio que serán liberadas, por el cambio de tecnología analógica a digital. [19]

En una conferencia realizada por los miembros de OFCOM, se dispuso a establecer estudios de espacios en blancos para cuando se liberen los canales de FM, además aparezcan nuevos usuarios para que hagan uso de estas frecuencias y así podrían proponer diversas aplicaciones, por ejemplo un ancho de banda móvil en zonas rurales.

Esta tecnología se basa principalmente en identificar las bandas desocupadas denominada espacios en blancos, para la transmisión y recepción de señales inalámbricas. Si se compara con el Wi-Fi y Bluetooth que son otros tipos de tecnología inalámbrica, los dispositivos de espacios en blancos se están diseñando para hacer un uso más extenso de frecuencia, la cual incorpora bajas frecuencias que comúnmente fueron reservadas para TV.

En el continente Europeo, OFCOM ha sido pionera en el desarrollo de los dispositivos de espacios en blancos que posibiliten el funcionamiento

óptimo en las frecuencias liberadas pero sin obstaculizar a los demás usuarios del espectro, [19]. Por ahora los estudios se basan en los espacios en blancos entre los canales de TV Digital, pero en la práctica esta tecnología también puede funcionar para las bandas de radio FM.

En conclusión, el espectro es un recurso que está en constante crecimiento promovida por la gran demanda de los teléfonos inteligente y otras tecnologías inalámbricas. Al mismo tiempo sólo existe una misma cantidad de frecuencia para todos, por lo que los dispositivos de espacios en blanco sería una solución eficaz. [20]

Los representantes de algunas de las compañías de tecnología de Reino Unido han anunciado la formación del Cambridge TV White Spaces Consorcio. Estas asociaciones tecnológicas tienen como fin de explorar cómo el espectro de TV sin utilizar podría proporcionar una solución de coste contenido para satisfacer la escalada de requisitos de conectividad inalámbricos para los consumidores y negocios de Reino Unido en pueblos, ciudades y áreas rurales. [21]

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA Y MODELAMIENTO

En este capítulo se detalla con precisión el escenario de estudio, la metodología, la descripción de la medición donde se muestra el equipo de trabajo y el algoritmo para capturar la señal de potencia; como también se propone el modelamiento estocástico para la disponibilidad de canales en la banda de radiodifusión FM.

3.1 Escenario de estudio y metodología

El presente escenario de estudio se encuentra en la zona comercial del centro de la ciudad, donde se concentra una gran cantidad de edificios (ver Figura 3.1); El estudio se realizará dentro del edificio en una zona urbana debido a la disminución de la intensidad de la señal FM (fading).

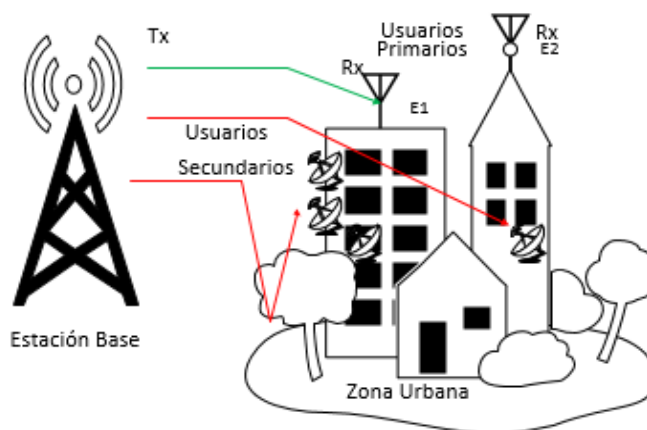


Figura 3.1: Escenario de estudio

El edificio en su interior provoca pérdidas de la señal de radiodifusión FM por las gruesas paredes de la estructura, ventanales, pisos y otras zonas y también depende de cómo tan distribuidas las oficinas de cada piso, con esto la intensidad de la señal se atenúa a tal punto que se estima un White Spaces

Las mediciones se capturan durante el lapso de 21 días aproximadamente, se inicia en la planta baja del edificio y cada 7 días después de obtener unas 35.000 muestras de los 50 canales de radiodifusión FM, luego se cambia de lugar, a la media planta y planta alta respectivamente.

Se utiliza un dispositivo llamado USRP (periférico de radio de serial universal) que es un radio definido por software, el cual recepta la potencia de la señal FM y luego los datos se procesan en un algoritmo de LABVIEW. Después de tener la matriz con los valores de potencia, se los analiza para obtener una matriz de estado, luego se calcula la disponibilidad usando la herramienta de MATLAB y por último se realiza el modelamiento estadístico del espectro para la radiodifusión FM. Además se realiza una curva de disponibilidad instantánea con la matriz de estado en Excel y un histograma con los canales de la banda FM.

3.2 Descripción de la medición

El equipo de medición usado para este estudio comprende los siguientes 3 elementos: antena, USRP y PC. Ver Figura 3.2

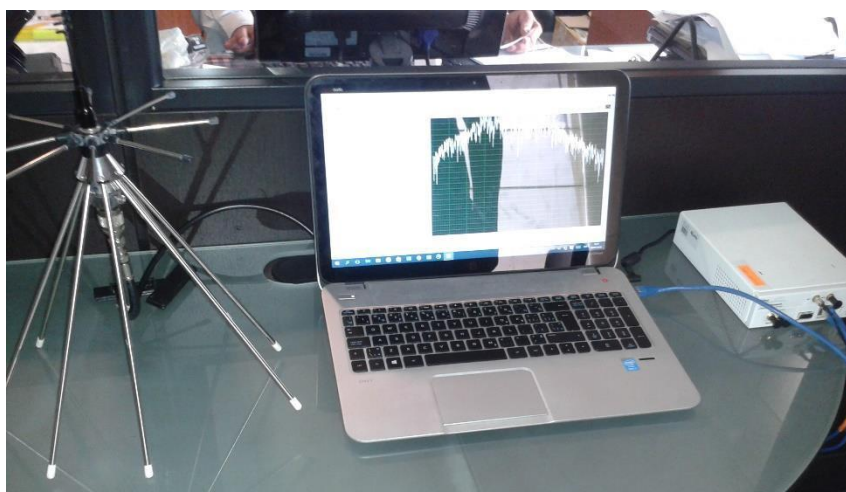


Figura 3.2: Equipo de medición

El USRP captura la señal de potencia (P_R) que viene de la antena y viaja a través del conector, el respectivo estudio tiene como base la detección de energía del espectro, por lo que es necesario medir la potencia en la zona externa de la antena (P_{ANT}). Donde se debe relacionar la siguiente función:

$$P_{ANT} = P_R + L + L_c - G - G_{ANT} \quad (3.1)$$

Donde L es la pérdida del cable que conecta la antena con USRP, L_c es la pérdida por los conectores, G es el amplificador interno del USRP y G_{ANT} es la ganancia respectiva de la antena. Gracias al amplificador integrado (G) en el USRP se pueden deshacer las pérdidas de potencia del cable y conectores, para ahora si tener el nivel de potencia deseado ($P_{ANT} = P_R$).

Se utiliza una antena SIRIO SD-3000 para monitorear la banda FM, además el equipo USRP-N200 con tarjeta WBX, que puede medir un rango de frecuencia desde 50-2000 MHz, tiene cable Gigabit-Ethernet para la comunicación con el sistema de control en la PC. El algoritmo se ejecuta en LABVIEW y recorre canal por canal para ir capturando el nivel de potencia y guardar los datos en un archivo de Excel.

El equipo fue configurado con un ancho de banda de 200KHz que corresponde a un canal de FM, además se introdujo un salto de 400KHz para medir los canales adyacentes de la banda FM, por lo cual el USRP capturó los niveles de potencia canal por canal de los 50 canales asignados a la banda FM. Ver figura 3.3.

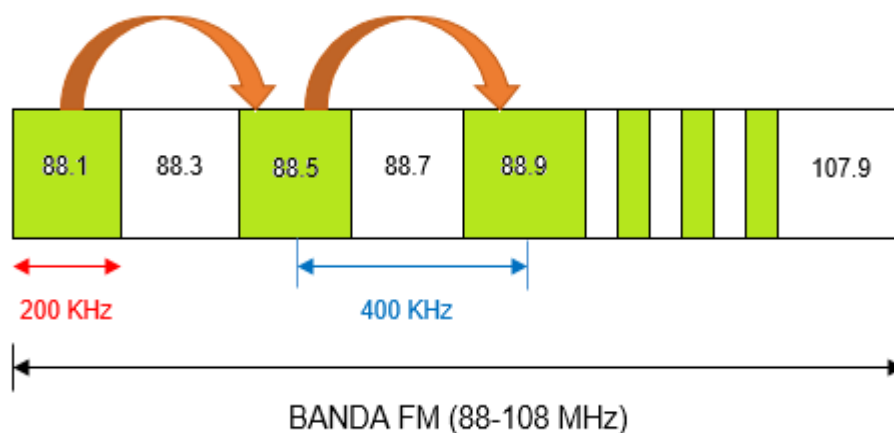


Figura 3.3: Asignación de banda FM

3.3 Algoritmo para la medición de la señal

Con el fin de analizar el rango de frecuencia en la banda FM, se ha creado un algoritmo con la herramienta de LABVIEW junto con el equipo de medición el USRP N210. A continuación se analiza el procedimiento del algoritmo.

Parámetros: frecuencia inicial (f_i), frecuencia final (f_n), total de muestras (88-108 MHz), tiempo de captura por canal (T_c), tiempo de muestreo por canal (f_s), dirección IP del equipo (IP), Ganancia, un estado (V o F).

Mediante un diagrama de bloques como se ilustra en la Figura 3.4, se puede representar el algoritmo usado para la recepción de datos. Como primer paso están los Parámetros que son usados por el USRP N210, una vez aquí se procede a configurar la dirección IP, la ganancia (G), frecuencia inicial (f_i), frecuencia final (f_n).

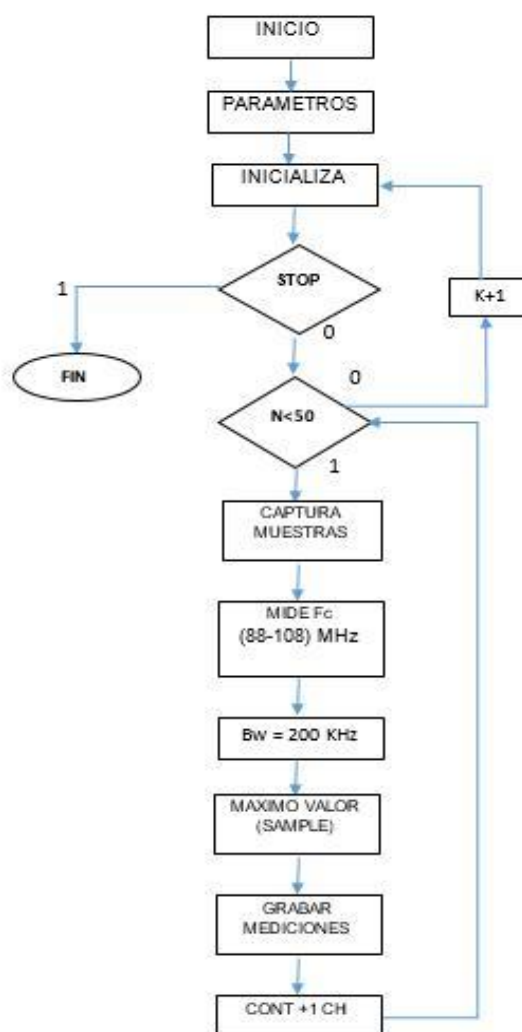


Figura 3.4: Diagrama ASM del algoritmo de medición

Después de la parametrización se procede a inicializar del programa, en lo cual consiste primero en escanear la frecuencia central definida anteriormente, para luego hacer la captura de esos canales y medir los diferentes niveles de potencia hasta recorrer por completo el número total de canales en la banda FM. Después de las mediciones el algoritmo elige el valor máximo de potencia de la muestra para luego almacenar los datos obtenidos en un archivo .xls (Excel), entonces al final el contador se incrementara en 1 para seguir con los siguientes canales.

Este procedimiento va a ser continuo hasta que la variable N llegue a su máximo valor (50), después de eso el contador vuelve a empezar desde cero y el proceso se repite ininterrumpidamente hasta que el programa cambie su estado (Stop=1), en cada suceso un contador se incrementa en 1 que viene a representar el número de muestras totales de la medición. Al final se va a tener un archivo .xls por cada canal de medición.

3.4 Modelo Estocástico

En el escenario de estudio se realizan varias mediciones (P_N), las cuales representan la señal de potencia transmitida por la estación base (X), la interferencia (I) y el ruido (N).

$$P = [P_1, P_2, \dots, P_N] = X + N + I \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.2 el ruido tiende a tener características gaussianas ya que la señal recibida tiene media ($\mu=0$) y varianza (σ^2). Además la interferencia de canal adyacente en la banda FM es de -20 dB y se asume nula. [9]

Después de considerar este punto, se determina el estado de la señal recibida a continuación.

En el criterio de Estado o detección de la señal, se obtiene la respuesta a un par de hipótesis y al rendimiento de la detección de energía (Sensing Energy), donde la detección y la probabilidad de falsa alarma están asociadas especialmente al umbral de potencia (threshold), que es un valor de sensibilidad de radiodifusión FM. Aquí se establece la siguiente función:

$$f(P_i) = \begin{cases} 0, & P_i > \lambda \\ 1, & P_i < \lambda \end{cases} \quad (3.3)$$

Donde (0) significa señal FM presente y (1) señal ausente. El umbral de potencia (λ) de FM es -93 dBm.

La variable $f(P_i)$ representa el estado del canal en comparación a un valor de umbral λ ; la cual permite determinar si el canal se encuentra disponible ($f(P_i) = 1$) u ocupado ($f(P_i) = 0$).

Una vez que se obtiene la función que representa el estado del canal, se puede determinar el modelo estocástico para representar la disponibilidad del canal en un instante de tiempo.

El criterio de Disponibilidad es un porcentaje para definir si el canal está disponible u ocupado en un determinado lapso de tiempo. Con los valores de la matriz de Estado se calcula este porcentaje y se usa la siguiente función:

$$A_j = \frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_i}{N} \quad (3.4)$$

La variable A representa la disponibilidad del canal en un lapso de tiempo, donde se adquieren N muestras de la variable ϵ (estado) para realizar un promedio.

En el cálculo de la granularidad de la variable de disponibilidad es fundamental el número de muestras N y el tiempo T_s que toma cada muestra en toda la banda FM (50 canales). Usando las siguientes funciones:

$$T_s = x \cdot (24) \cdot (3600) / K \text{ [s]} \quad (3.5)$$

Dónde: x es el tiempo en días que se demora la medición de cada planta y K el número total de muestras.

Se toma un lapso de 5 min, para encontrar la variable N .

$$N = 300 \text{ [s]} / T_s. \quad (3.6)$$

Para determinar la granularidad de la muestra, se usa el tamaño total de las muestras K dividido para N .

$$G = K/N. \quad (3.7)$$

Por último se procede a realizar la matriz de granularidad que tiene un tamaño igual a $G \times N$ y se calcula la media de los valores para obtener la matriz de disponibilidad canal por canal hasta completar los 50 canales de la banda FM.

Para finalizar con los cálculos, mediante los datos de disponibilidad se procede a realizar un test de Kolmogorov-Smirnov. [22]

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS DEL ESTUDIO

4.1 Localización geográfica

El escenario de estudio comprende un edificio mayor a 10 pisos y las mediciones se realizan en el interior, este edificio se ubica en la zona comercial del centro de Guayaquil (Ver Figura 4.1). El edificio tiene 24 pisos y lleva por nombre San Francisco 300 ubicado en la Plaza San Francisco que se encuentra en la Av. 9 de Octubre y Córdoba. Ver Figura 4.2.



Figura 4.1: Localización del escenario.

La ubicación del escenario de estudio tiene las siguientes coordenadas: Latitud $2^{\circ} 11'30.90''S$, Longitud: $79^{\circ}52'53.13''O$.

En la fig. 4.2 se muestra el edificio en 3D con ayuda de la aplicación google Earth.



Figura 4.2: Edificio San Francisco 300

El perfil de elevación tiene una longitud igual a 1.20km. Desde el Edificio San Francisco 300, donde se realiza el estudio hasta el Cerro del Carmen, donde se ubican los transmisores de radio FM. Ver Figura 4.3

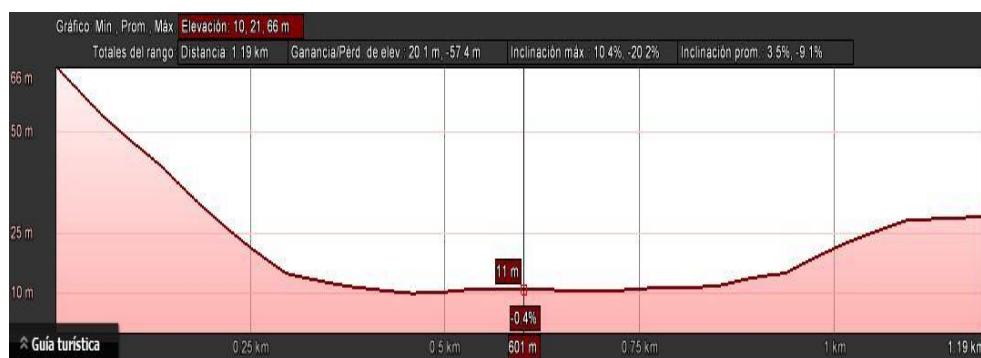


Figura 4.3. Perfil de Elevación

4.2 Parámetros de Configuración

El presente estudio se estableció en la banda VHF-FM, la cual se despliega desde 80 MHz hasta 108 MHz (canales 1-50), cada canal tiene un ancho de 200 KHz.

Parámetros	Valores
Ancho de Banda, BW	88-108 MHz
Ancho de Banda del Canal, Δf	200 KHz
Frecuencia Inicial, f_0	88.1 MHz
Frecuencia Final, f_n	107.9 MHz
Canal Inicial, Ch_1	1
Canal Final, Ch_n	50
Número de Canales, N	50
Numero de Muestras (Disponibilidad), N_s	22
Potencia de Umbral, λ	-93 dBm
Tiempo de Captura por Canal, T_c	0.22 s
Tiempo de Muestreo por Canal, T_s	13.63 s

Tabla 5. Parámetros de Configuración

En la Tabla 5, se observan los parámetros iniciales para la configuración del USRP, también el número de muestras por canal (N_s) para calcular la disponibilidad. Además se obtuvieron los tiempos de captura por cada canal (T_s) y por banda (T_c), en la cual servirán para el cálculo de la granularidad que es indispensable para la determinación de la disponibilidad de los canales.

4.3 Resultados de la medición

En las siguientes figuras se pueden observar los datos obtenidos por el estudio de los niveles de potencia de las 3 plantas del edificio: baja, media y alta. En el lado derecho de cada grafica se observa la variación del nivel de potencia mediante colores, donde: rojo significa señal con potencia elevada (-20) y azul significa señal con potencia débil (-100).

En la Figura 4.5 se muestran los niveles de potencia de los 50 canales de la banda FM (80-108 MHz) en la planta baja; donde se aprecia que en los primeros 25 canales influye mayor concentración de potencia entre -50 y -60 dBm. Para los canales 1, 2, 3 y 19 su potencia está por debajo de -80 dBm.

Para los últimos 25 canales de la lista influye mayor concentración de potencia entre -80 y -90 dBm con mucha claridad, para los canales entre 30 y 35 su potencia se mantiene cercana a -70 dBm, para los canales 36, 38, 43 se encuentran por debajo de -90 dBm, es decir, que su señal es muy débil en esas frecuencias, podrían superar el umbral de potencia ($\lambda = -93$ dBm) lo que deriva a una posible disponibilidad de canales.

En la Figura 4.6 se muestran los niveles de potencia de los 50 canales de la banda FM (80-108 MHz) en la planta media; donde se aprecia que en los primeros 25 canales influye mayor concentración de potencia elevada entre -45 y -60 dBm, para el canal 18 (94.9 MHz) se percibe que su potencia está por encima de -40 dBm, lo que indica que su señal es muy fuerte y llega con buena recepción en esa ubicación.

Para los últimos 25 canales de la lista influye mayor concentración de potencia entre -50 y -70 dBm con mucha claridad, para los canales entre 26 y 35 su potencia se mantiene entre -50 y -65 dBm, para los canales 36, 38, 43 y 47 se encuentran cercana a -80 dBm, es decir, que las señales en la planta media predomina el color verde y celeste por lo que no superan el umbral de potencia ($\lambda = -93$ dBm), lo que deriva a una posible ocupación de canales.

En la Figura 4.7 se muestran los niveles de potencia de los 50 canales de la banda FM (80-108 MHz) en la planta alta; donde se aprecia que influye mayor concentración de potencia entre -20 y -30 dBm y solo 2 canales (25 y 32) presenta niveles bajos de potencia cercanos a -70 dBm.

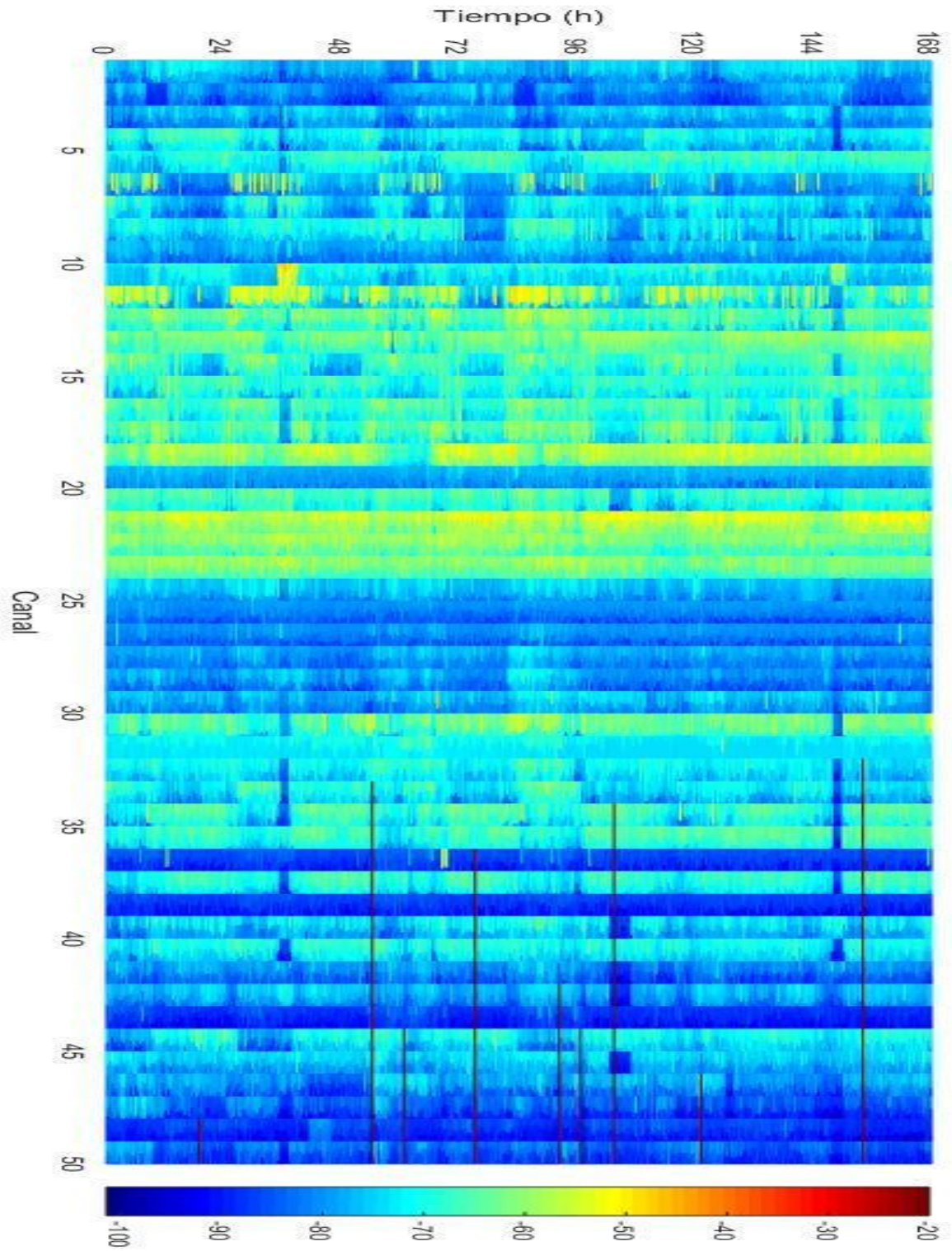


Figura 4.4: Niveles de potencia de la banda FM (planta baja)

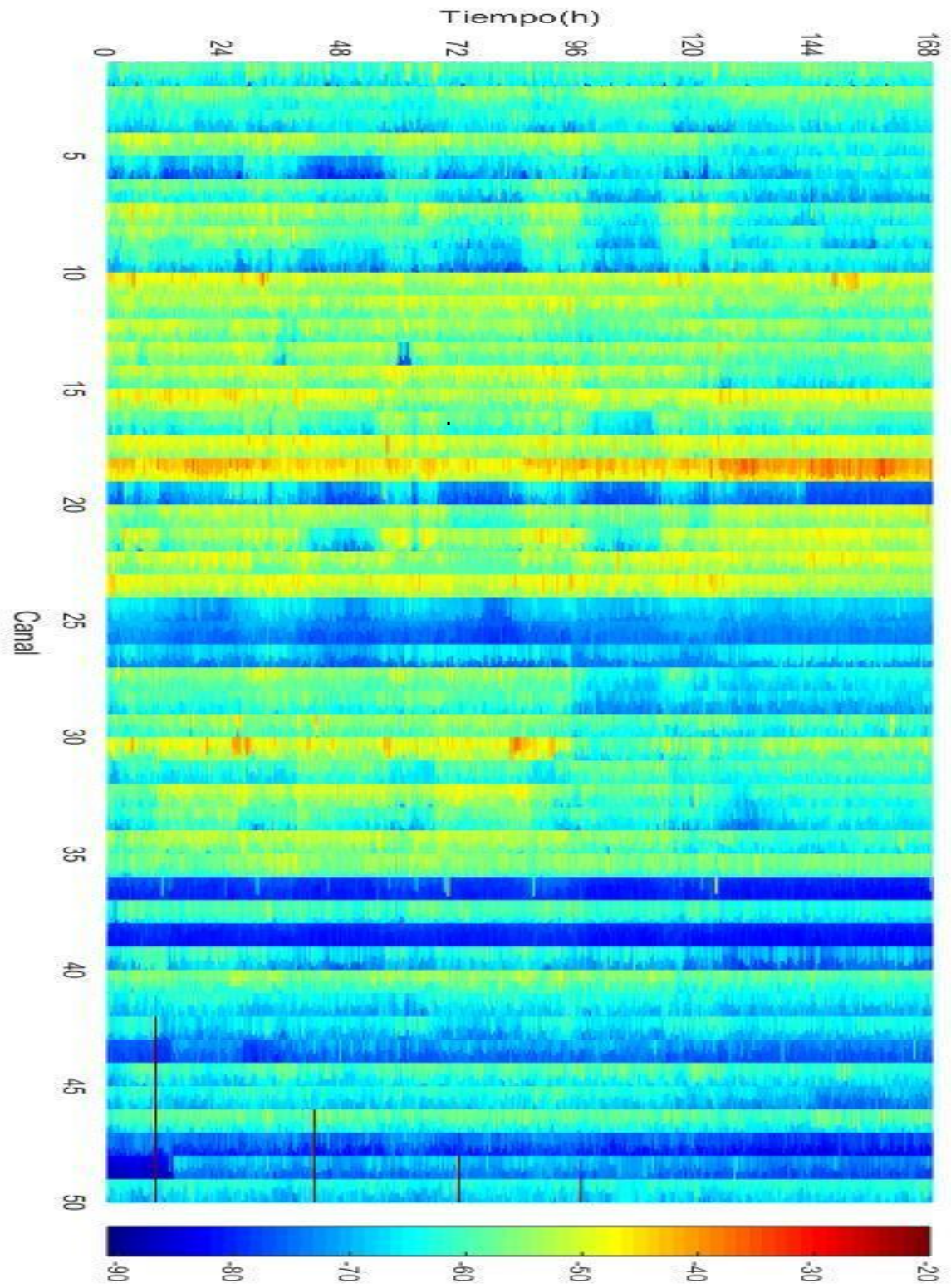


Figura 4.5: Niveles de potencia de la banda FM (planta media)

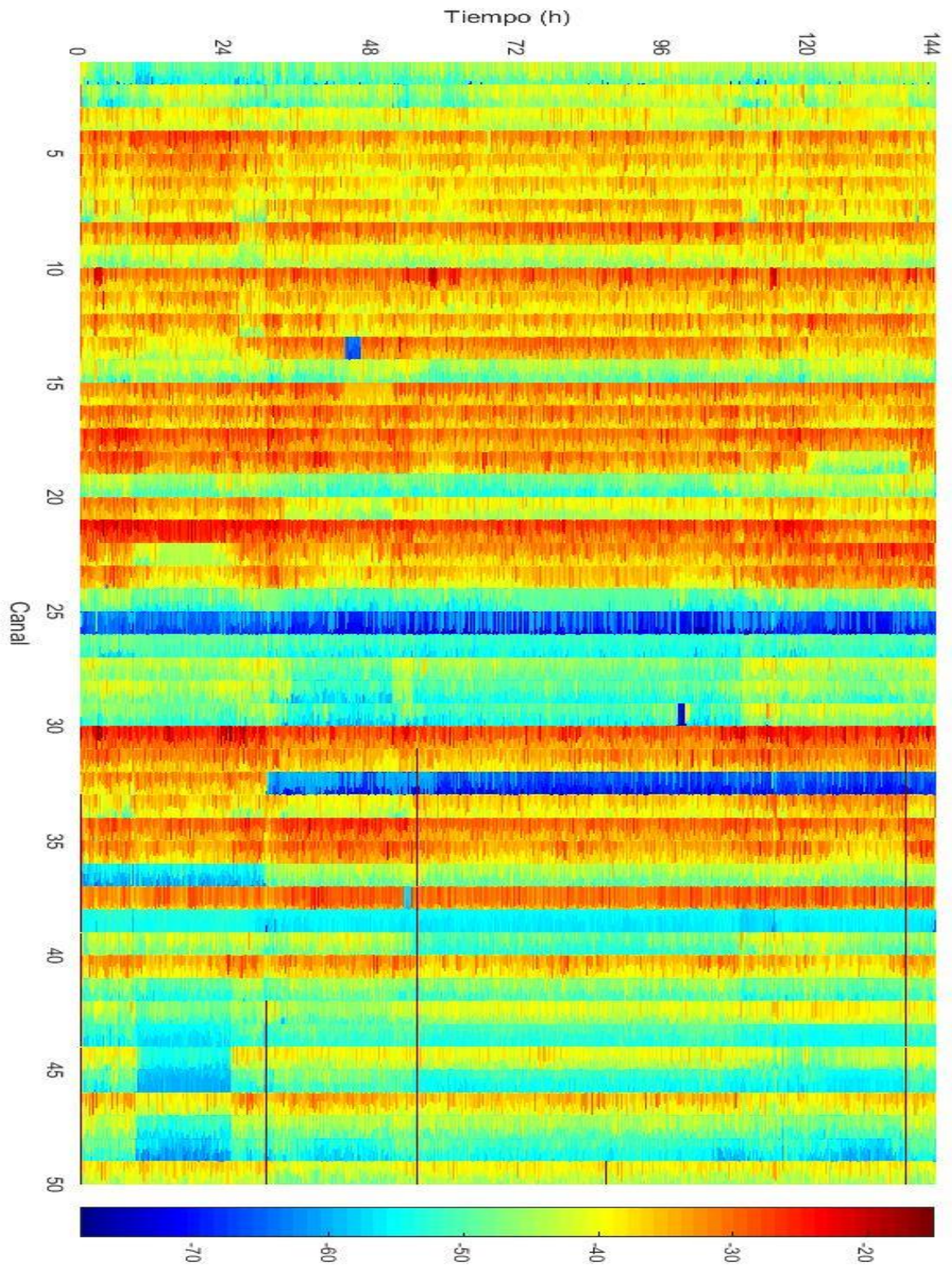


Figura 4.6: Niveles de potencia de la banda FM (planta alta).

A continuación se analiza la disponibilidad temporal de los canales en la banda FM medidos en las 3 plantas del edificio. En el lado derecho de cada gráfica se observa la variación de disponibilidad mediante colores, donde: rojo significa canal con alta disponibilidad temporal y azul significa canal con 0 % de disponibilidad temporal.

En la Figura 4.8 se muestra la disponibilidad de canales en la planta baja, para los canales 36, 38 y 43 su señal de potencia era débil, por lo cual tienden a una disponibilidad alta y fiable donde pueden intervenir los sistemas OSA. Algunos canales como 47 y 48 muestran niveles con disponibilidad intermitente, ya que tienen sus niveles de potencia cercanos al umbral.

El canal 48 tiene característica intermitente, además un lapso donde la disponibilidad es alta y el canal no es usado, que se observa en la parte roja superior del canal. Ciertos canales 41,42 y 45 tienen una pequeña disponibilidad en toda el área de color azul. Por otra parte los primeros 25 canales de la banda muestran un grado de 0% de disponibilidad. Después de analizar la gráfica se determina que los canales 38 y 43 son los únicos con mayor grado de disponibilidad.

En la Figura 4.9 se muestra la disponibilidad de canales en la planta media. En todos los canales se presenta disponibilidad nula, por lo tanto esta banda está totalmente ocupada.

En la Figura 4.10 se muestra la disponibilidad de canales en la planta alta. Con lo que se pudo observar en la figura anterior, se predice que esta banda también se encuentra totalmente ocupada.

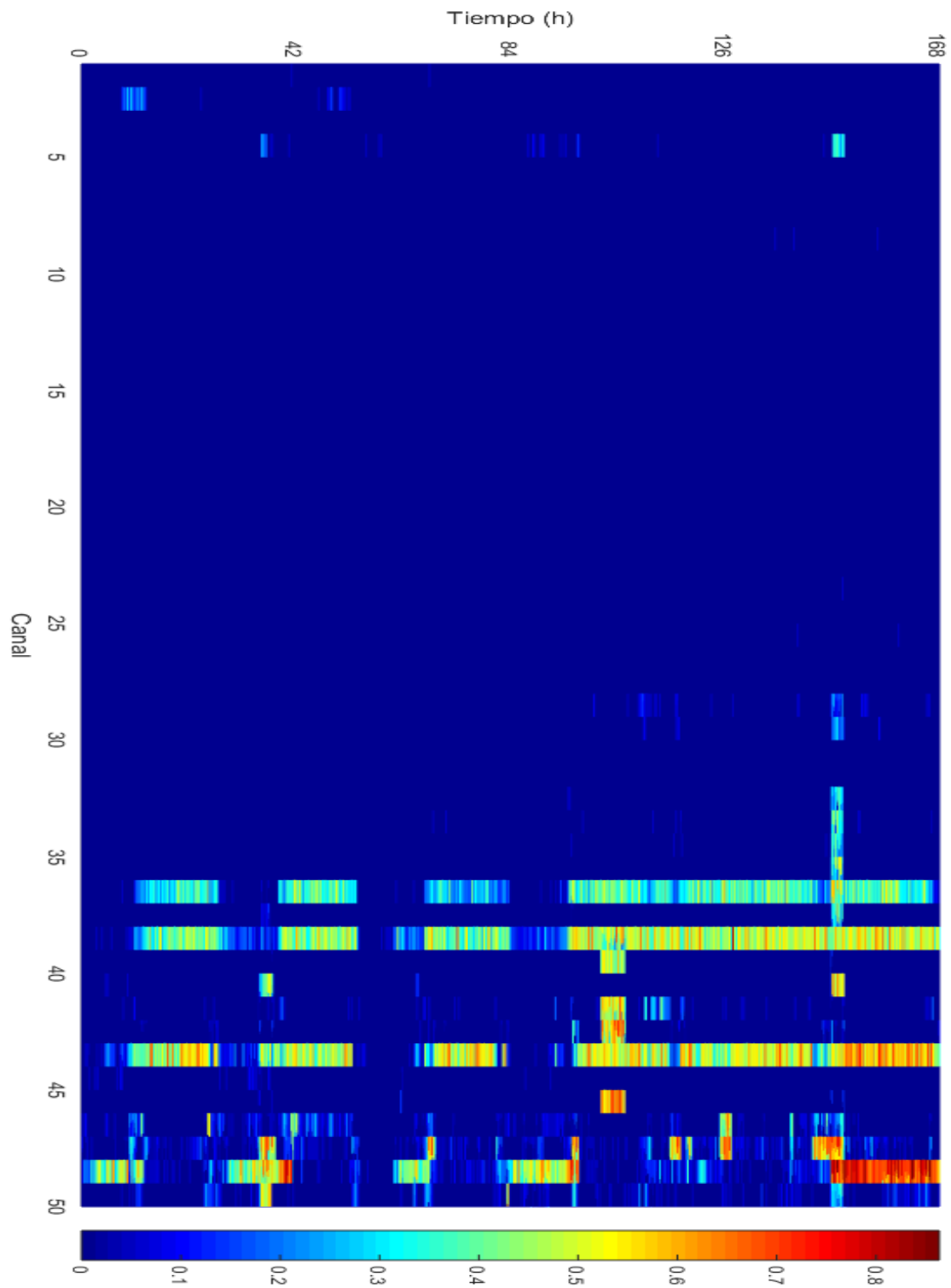


Figura 4.7: Disponibilidad de canales en la banda FM (planta baja).

La disponibilidad en la planta media y alta es nula debido a que los niveles de potencia son altos, se capturaban señales con mucha intensidad y estas no llegan al umbral de disponibilidad.

En esta parte se toman los canales 12 y 26 para poder analizar su histograma de la planta media y alta.

Histograma con ajuste de distribución Normal en canal 12.

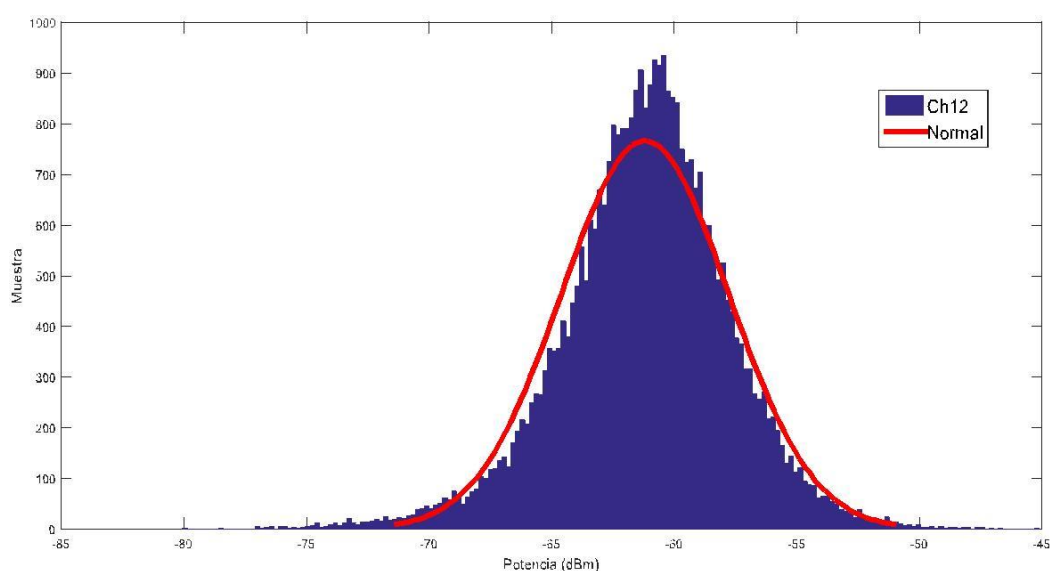


Figura 4.8: Histograma del canal 12 en planta media.

Como se observa en la Figura 4.8, la porción azul son los niveles de potencia del canal 12 en la planta media graficados en un histograma con ajuste de distribución, entonces esta gráfica toma una curva con distribución gaussiana equivalente a la Normal con media $\mu = -61.2$ dBm y desviación $\sigma = 3.41$, además el nivel de potencia excede a la curva gaussiana, por lo cual la intensidad de la señal es muy alta y la recepción es muy buena mitigando el ruido. El mínimo valor de potencia se ubica entre -75 y -70 dBm, es decir, no supera el umbral de disponibilidad por lo que este canal se encuentra ocupado durante todo el tiempo.

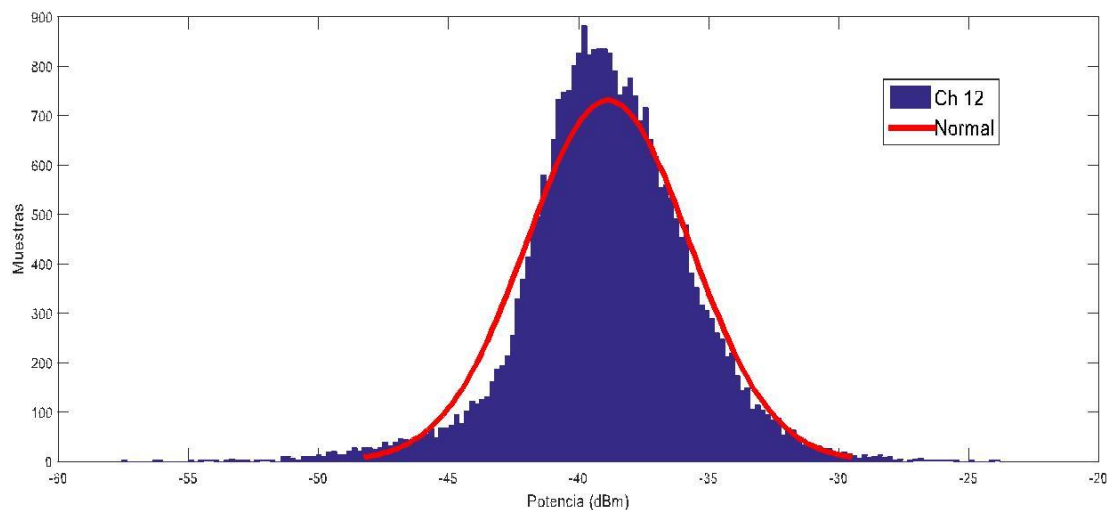


Figura 4.9: Histograma del canal 12 en planta alta.

Como se muestra en la Figura 4.9 los datos de potencia del canal 12 en la planta alta se ajustan a una distribución Normal con media $\mu = -38,86$ dBm y desviación $\sigma = 3,13$. La curva gaussiana se asemeja con los datos y el nivel de potencia excede a la curva. El mínimo valor de potencia se ubica entre -55 y -50 dBm, es decir, no supera el umbral de disponibilidad por lo que este canal se encuentra ocupado durante todo el tiempo.

Histograma con ajuste de distribución Normal en canal 26.

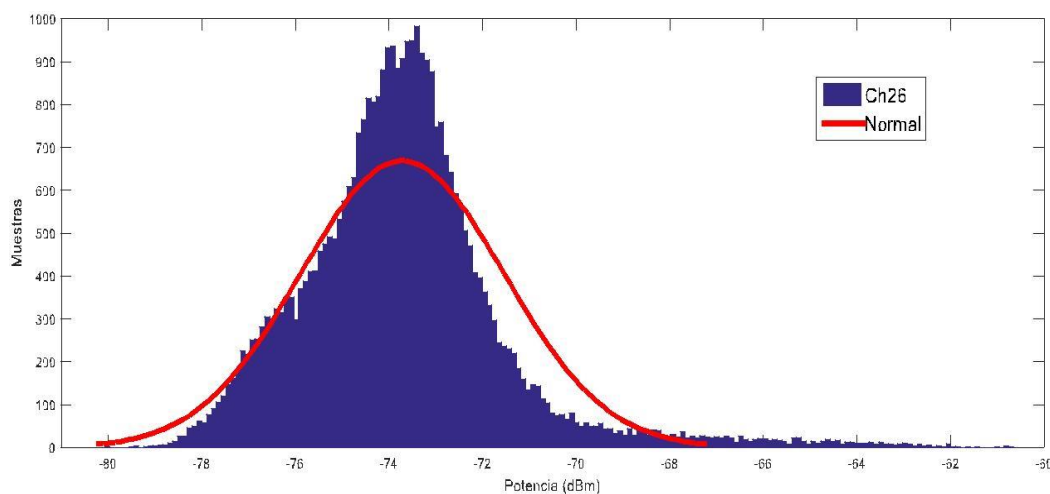


Figura 4.10: Histograma del canal 26 en planta media.

Como se muestra en la Figura 4.10 los datos de potencia del canal 26 en la planta media se ajustan a una distribución Normal ($\mu=-73,76$ dBm $\sigma=2,17$). La curva gaussiana no tiene ninguna similitud con los datos, más bien presenta ruido y el nivel de potencia excede muy fuerte a la curva. El mínimo valor de potencia se ubica entre -80 y -70 dBm, es decir, no supera el umbral de disponibilidad por lo que este canal se encuentra ocupado durante todo el tiempo.

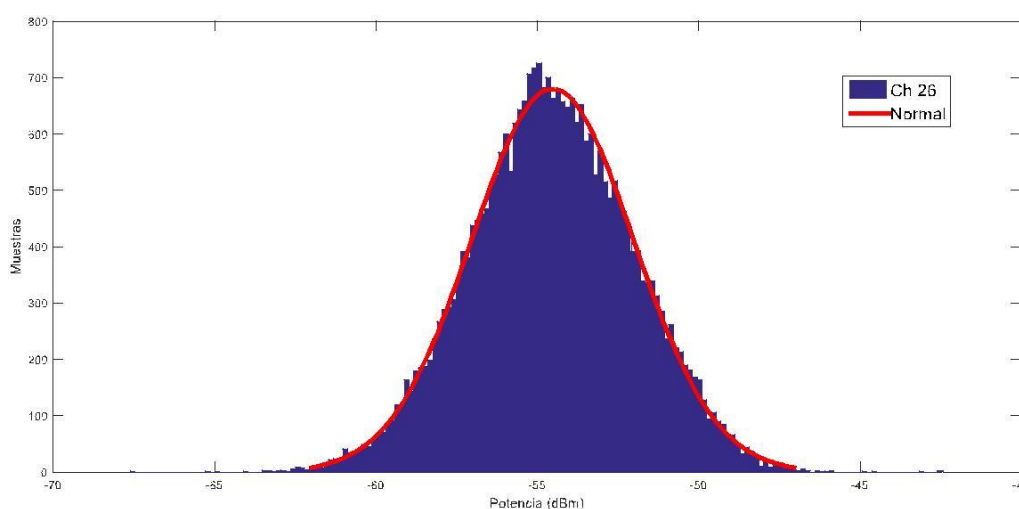


Figura 4.11: Histograma del canal 26 en planta alta.

Como se observa en la Figura 4.11 los valores de potencia del canal 26 de la planta alta del histograma se ajustan a una distribución gaussiana Normal ($\mu=-54,52$, $\sigma=2,51$). La curva gaussiana muestra una similitud exacta con los datos, donde se mitiga el ruido y la recepción de la señal es muy nítida. El mínimo valor de potencia se ubica entre -60 y -70 dBm, es decir, no supera el umbral de disponibilidad por lo que este canal se encuentra ocupado durante todo el tiempo.

4.4 Ajuste Estadístico de los resultados

Después del análisis de los resultados del estudio, se determina la disponibilidad completa de la banda FM de las 3 plantas del edificio con ayuda de la herramienta de Matlab.

En la Figura 4.12 se observa la CDF del número de canales disponibles al mismo tiempo, donde la curva de color rojo nos representa una disponibilidad nula en la planta media y alta.

En la curva de color azul se distingue que existe cierto grado de disponibilidad de canales en la planta baja, donde la media en este lugar es de 1 canal (200 KHz) con 70,12% de probabilidad, además se pueden adquirir 2 canales (400 KHz) con un 90.63 % de probabilidad de ocurrencia, es decir, que existen disponibles 400 KHz de espectro en la banda de radiodifusión FM en un 90.63% del tiempo, para emplear nuevos sistemas de comunicación en la planta baja del edificio.

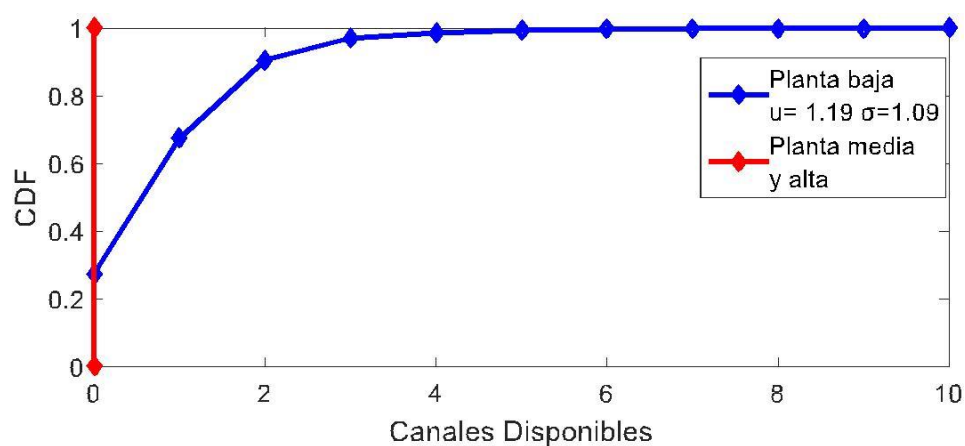


Figura 4.12: Número de canales con disponibilidad instantánea

En la Figura 4.13 se observa la distribución de probabilidad acumulada (CDF) de los resultados obtenidos en el canal 36 (102.1 MHz), donde se compara con tres modelos estadísticos: Normal ($\mu=0.183066$, $\sigma=0.147122$), Generalized Extreme Value ($k=-0.208902$, $\sigma=0.137703$, $u=0.125975$) y Logistic ($u=0.181204$, $\sigma=0.088882$), en la cual se puede concluir que las curvas tienen similitud por lo cual dichos modelos estadísticos pueden representar el comportamiento del canal.

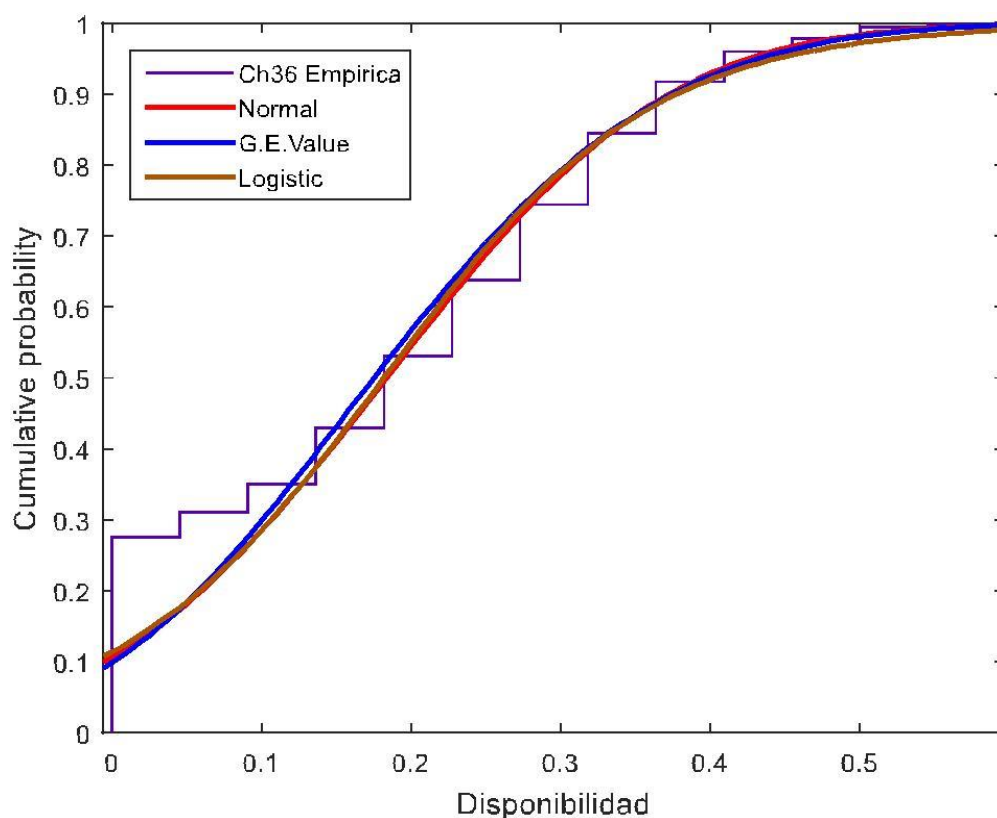


Figura 4.13: Modelamiento estadístico del canal 36 en la banda FM

En la Figura 4.14 se realiza el mismo procedimiento para el análisis del canal 38 (102.5 MHz) de la banda FM. Después de obtener el CDF se procede a comparar con los tres modelos estadísticos: Normal ($\mu=0.286792$, $\sigma=0.17109$), G. Extreme Value ($\mu=0.225397$, $\sigma=0.173395$, $k=-0.287146$) y Logistic ($\mu=0.295857$, $\sigma=0.101483$), por lo visto existe una similitud entre los datos empíricos y los 3 modelos, entonces es posible representar el comportamiento estadístico del canal 38 con estos modelos.

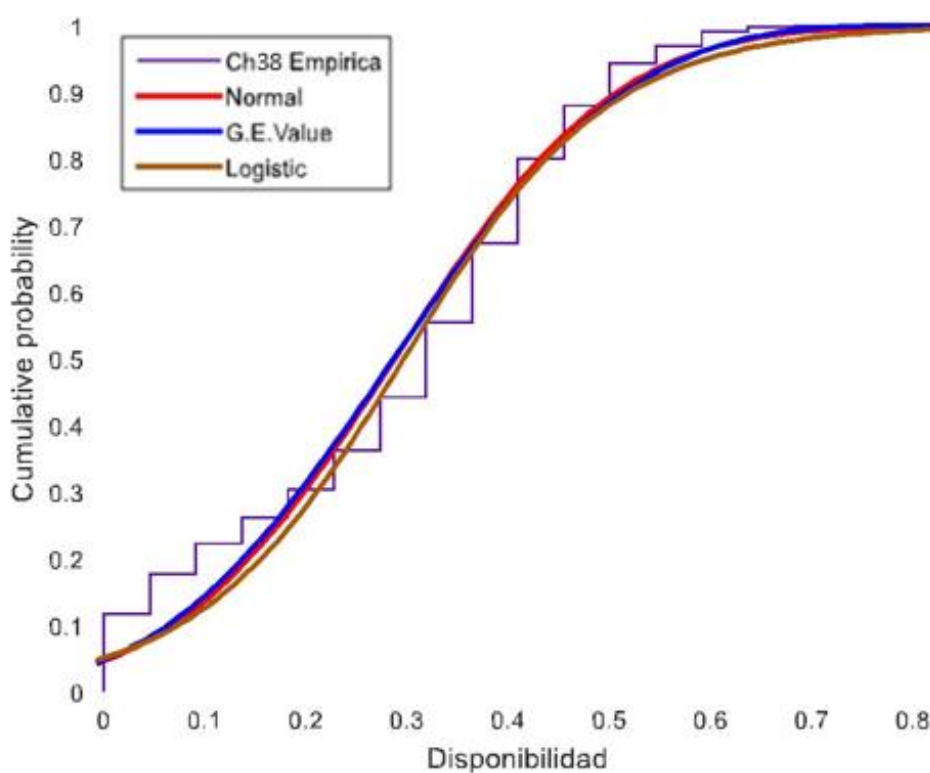


Figura 4.14: Modelamiento estadístico del canal 38 de la banda FM.

En la Figura 4.15 se observa la distribución de probabilidad acumulada (CDF) de los resultados obtenidos en el canal 43 (104.9 MHz), donde se compara con tres modelos estadísticos: Normal ($\mu= 0.298219$, $\sigma= 0.202053$), Generalized Extreme Value ($k=-0.406795$, $\sigma=0.210814$, $u=0.238763$) y Logistic ($u=0.30706$, $\sigma=0.12211$), en la cual se puede concluir que las curva G.E. Value tienen similitud con los datos empíricos por lo cual dicho modelo estadísticos puede representar el comportamiento del canal.

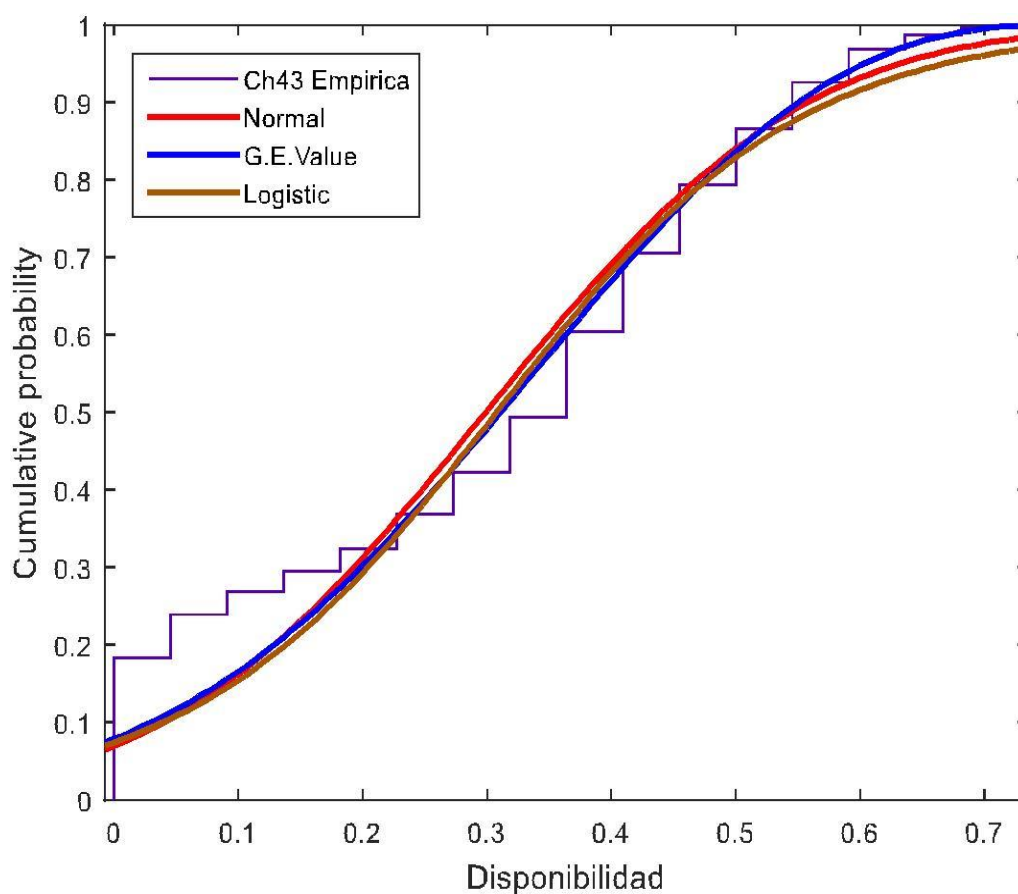


Figura 4.15: Modelamiento estadístico del canal 43 de la banda FM.

A continuación se realiza el modelamiento estocásticos de los datos para la planta baja, porque la medición de planta media y alta tienen como resultado disponibilidad nula en todos sus canales.

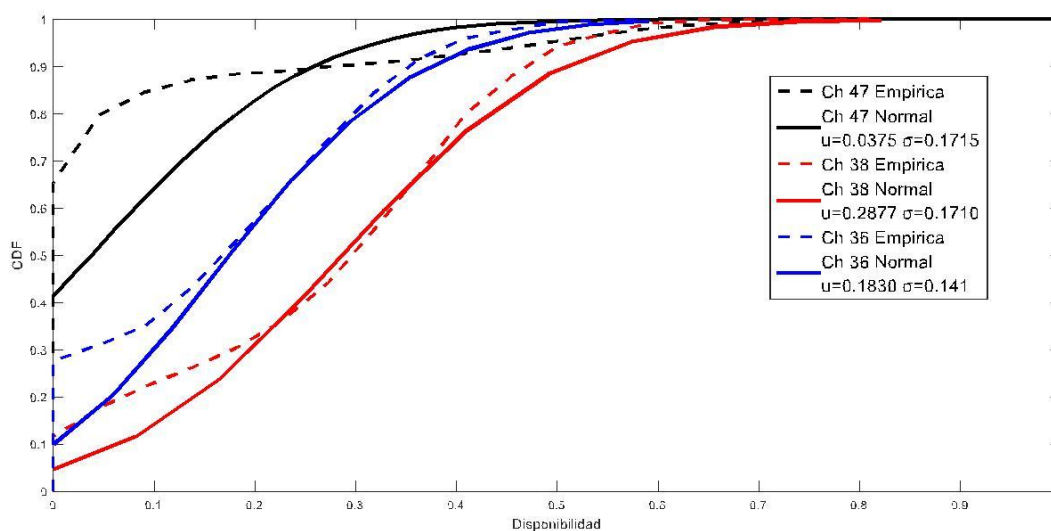


Figura 4.16: Modelamiento de la disponibilidad de canales -Parte 1.

Como se observa en la Figura 4.16 los canales 36 y 38 tienen su distribución de probabilidad acumulada empíricas similares al modelo propuesto por la CDF Normal, esto quiere decir que el comportamiento estadístico de la disponibilidad de cada canal se puede representar con dicho modelo. Además se aprecia que el canal 38 tiene mayor disponibilidad temporal que el canal 36 ya que su curva inicia más a la derecha y su valor de u es mayor. Entonces el canal 47 tiende a tener una mínima disponibilidad y a estar ocupado porque inicia con un valor alto de CDF, el valor de u es muy cercano a 0 y su curva es cóncava proyectando niveles mínimos de disponibilidad.

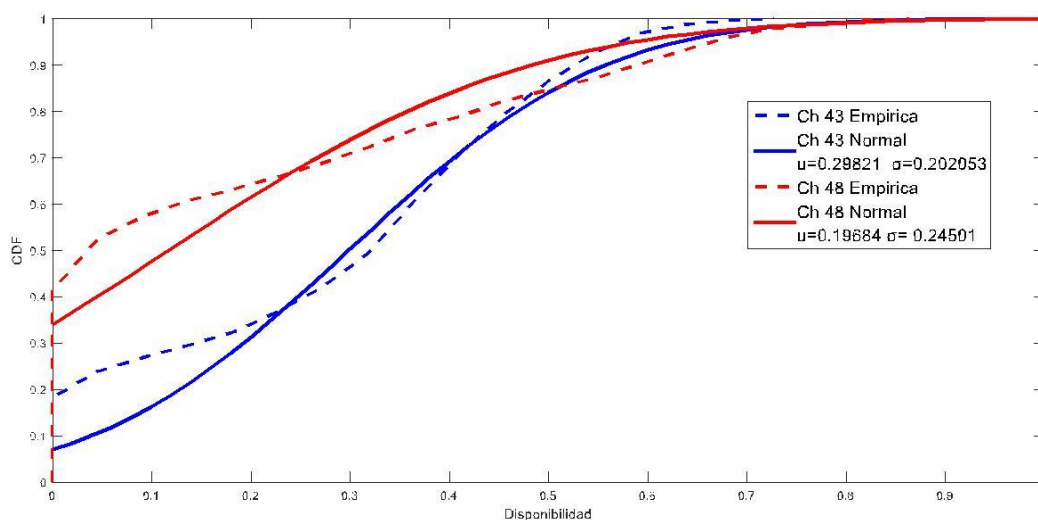


Figura 4.17: Modelamiento de la disponibilidad de canales – Parte 2.

Como se observa en la Figura 4.17 ambos canales tienen su CDF empírico similar al modelo propuesto de CDF Normal, por lo que es posible determinar su comportamiento estocástico de la disponibilidad de ambos canales. El canal 48 viene con una disponibilidad intermitente ya que su curva inicia cerca al valor medio del CDF y está un poco inclinada hacia la derecha. En cambio el canal 43 posee una excelente disponibilidad porque inicia con valores pequeños de CDF. Ahora si comparamos las gráficas anteriores, los canales 43 y 38 tienen mayor porcentaje de disponibilidad de toda la banda FM, pero el canal 43 tiene mayor disponibilidad temporal que el canal 38, ya que el canal 43 tiene un valor de μ mayor.

CONCLUSIONES

1. Las gráficas de disponibilidad de los canales en la banda FM en la planta media y alta muestran una ocupación total de los 50 canales debido a que el escenario de medición se encuentra muy cerca al cerro del Carmen donde están las antenas de transmisión de radiodifusión FM y la señal de potencia irradia sobre estas zonas del edificio con mayor intensidad.
2. Con el resultado obtenido en la planta baja se concluye que existen dos canales disponibles temporalmente con 400 KHz de ancho de banda para introducir nuevos sistemas de comunicación con acceso oportunista del espectro dentro del edificio.
3. La frecuencia 102.1 MHz (Ch. 36) que representa a la emisora WQ radio, muestra una disponibilidad intermitente en la planta baja debido a que la recepción de la señal presenta interferencia, esto conlleva a que la señal audible de la emisora presente ruido.
4. Observando las tres gráficas de niveles de potencia se concluye que la señal llega con mayor intensidad en los lugares más altos del edificio, porque teóricamente existe una línea de vista directa entre la planta alta y media del edificio con las antenas del cerro del Carmen, pero existe difracción y reflexión de la señal y esta llega con menor intensidad en la primera planta.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que para un siguiente estudio de disponibilidad de canal en la banda FM, se localice un edificio con una distancia mayor a 2.5 km de las antenas transmisoras. Para este proyecto el edificio de estudio se encontraba muy cercano a las antenas del cerro del Carmen, por lo cual se vio afectado los niveles de potencia en la planta media y alta, lo que produjo una gráfica de disponibilidad de canales totalmente ocupados para los 50 canales que emplea la radiodifusión FM.
2. Elegir la ubicación del edificio manteniendo una línea de vista libre de obstáculos para capturar una señal de potencia con menor cantidad de interferencia utilizando el perfil de elevación mediante la aplicación de google Earth o Radio Mobile.
3. Se debe utilizar una computadora o laptop de última tecnología con procesadores muy rápidos y con puerto Giga-Ethernet, además escoger una tarjeta WBX para el USRP compatible con la banda de frecuencia a utilizar en el proyecto.
4. Colocar los equipos en un lugar adecuado dentro de la oficina para evitar sobrecalentamiento y a la vez evitar molestias a los usuarios del edificio. Es necesario visitar con regularidad el edificio para constatar el correcto funcionamiento de los equipos y obtener una medición continua de los datos, que es el principal argumento del proyecto.

ANEXOS

Emisoras de radio concesionadas en la ciudad de Guayaquil.

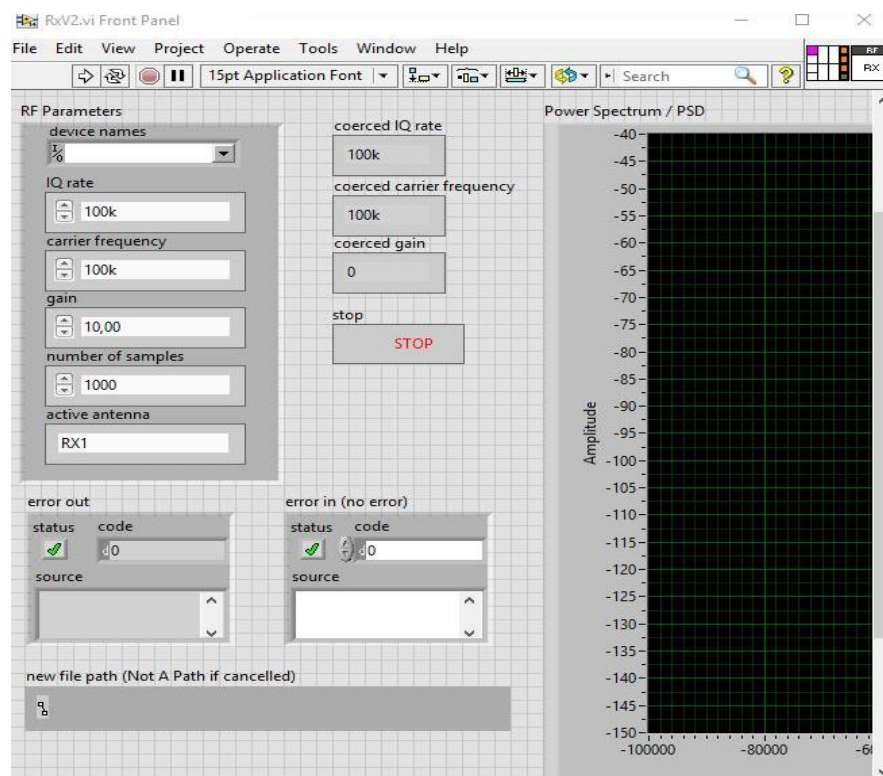
Tabla 6. Emisoras de radio concesionadas en la provincia del Guayas.

Radios FM					
Radio	MHz	Radio	MHz	Radio	MHz
Radio María	88.1	La Otra	94.9	Tú Radio/Costanera	101.7
Galaxia	88.5	Cupido	95.3	WQ Radio	102.1
Diblú	88.9	Metro Estéreo	95.7	HCJB2	102.5
Radio City	89.3	Onda Cero	96.1	sin señal	102.9
Punto Rojo	89.7	Tropicana	96.5	Joya Estéreo	103.3
Romance	90.1	Más Candela	96.9	Sonorama	103.7
Radio Canela	90.5	Nuevo Tiempo	97.3	Alfa Súper Estéreo	104.1
Radio Mix	90.9	Radio Centro	97.7	La Tuya	104.5
Tropicálida	91.3	Morena FM	98.1	Súper 11Q	104.9
Antena 3	91.7	JC Radio/La Bruja	98.5	Radio Pública del Ecuador	105.3
Estrella	92.1	I-99	98.9	Fabu	105.7
Forever Music	92.5	Sabor Mix	99.3	BBN Radio	106.1
Armónica	92.9	Élite	99.7	Radio Fuego	106.5
América	93.3	La Prensa	100.1	RADIO DEPORTIIN	106.9
Radio Disney	93.7	Radio Libre	93.9	Rumba Network	107.3
Onda Positiva	94.1	Asamblea Nacional	100.9	Radio E.	107.7
Platinum	94.5	La Estación	101.3		

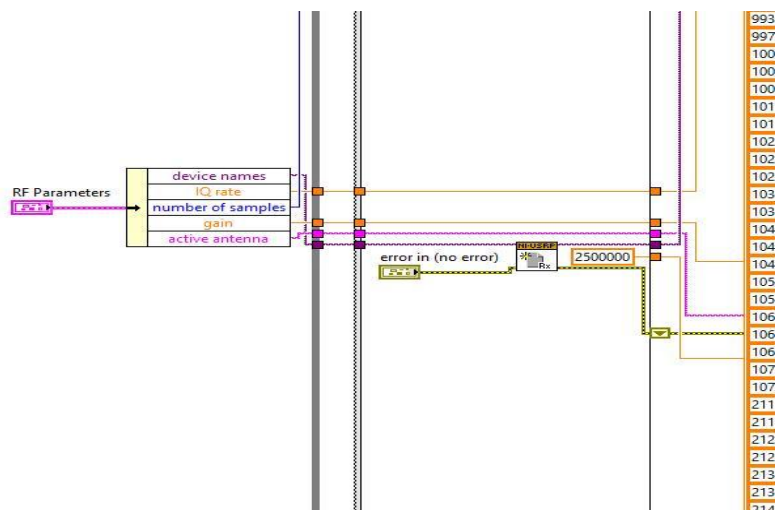
Tabla 7. Provincias con al menos 1 estación radial FM.

Provincias	Onda Corta	Frecuencia Modulada		FM	Total Estaciones
		Matriz	Repetidora	Total FM	
Azuay		34	40	74	74
Bolívar		17	6	23	23
Cañar		15	13	28	28
Carchi		18	15	33	33
Chimborazo		33	25	58	58
Cotopaxi	1	12	1	13	13
El Oro		29	20	49	49
Esmeraldas		23	18	41	41
Galápagos		8	8	16	16
Guayas		48	11	59	59
Imbabura	1	26	10	36	36
Loja	2	38	29	67	67
Los Ríos		18	16	34	34
Manabí		44	30	74	74
Morona S.	4	15	18	33	33
Napo	3	9	10	19	19
Orellana		10	6	16	16
Pastaza		17	6	23	23
Pichincha	2	45	8	43	43
Santa Elena		17	30	47	47
Santo Domingo	1	21	18	39	39
Sucumbíos		20	9	29	29
Tungurahua		20	22	42	42
Zamora C.		7	12	19	19
TOTAL	14	544	381	925	925

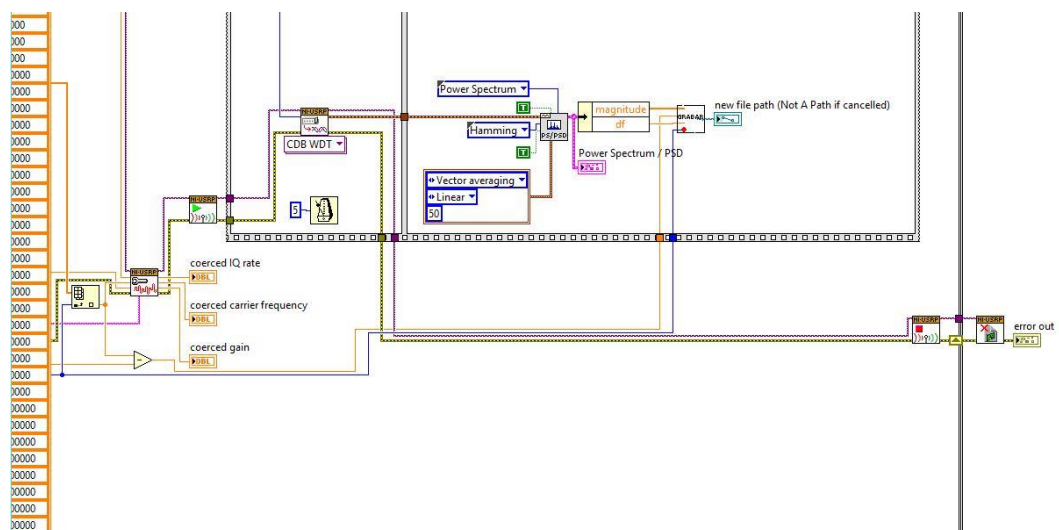
Anexo 1. Panel Frontal



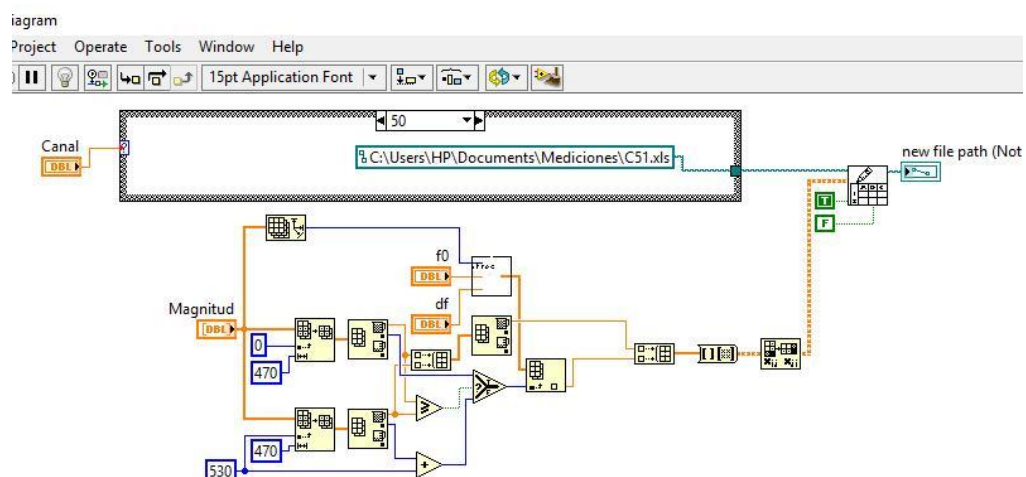
Anexo 2. Diagrama de bloques de RX



Anexo 3. Rx



Anexo 4. Grabar

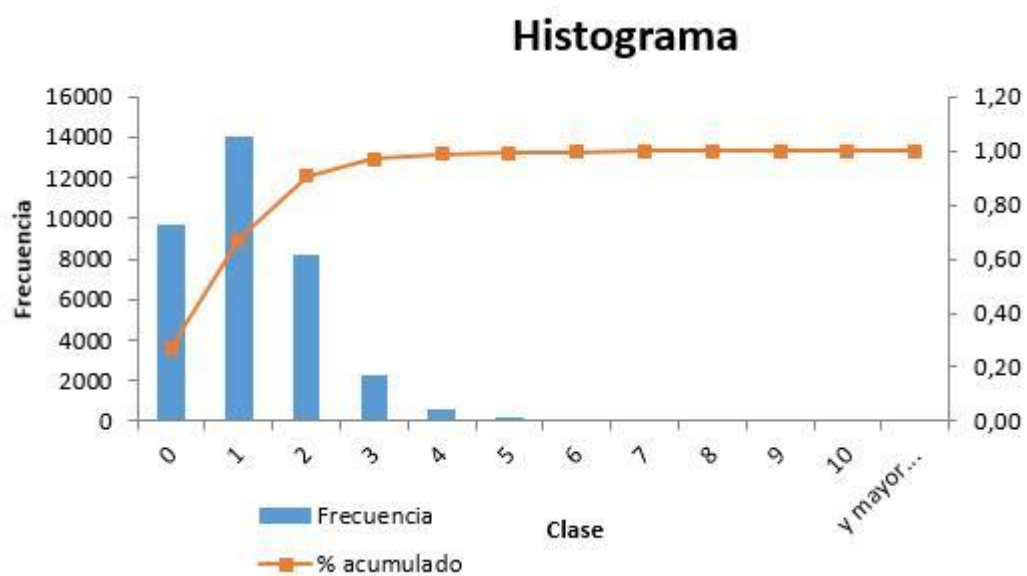


Disponibilidad Instantánea en Excel. (Planta Baja).

Clase	Frecuencia	% acumulado
0	9655	0,27
1	14045	0,67
2	8230	0,91
3	2312	0,97
4	566	0,99
5	210	0,99
6	139	1,00
7	71	1,00
8	34	1,00
9	9	1,00
10	4	1,00
y mayor...	0	100,00%

Tabla 8. Disponibilidad Instantánea (Planta Baja).

Anexo 5. Histograma de Disponibilidad



Test de Kolmogorov-Smirnov

Distribución Acumulada Normal con umbral $D=0.2206$

CH	μ	σ	D_α	KS Test
36	0.18307	0.14712	0.16904	ACEPTA
38	0,28679	0,17109	0,13111	ACEPTA
43	0,29822	0,20205	0,13346	ACEPTA

Tabla 9. Prueba Kolmogorov Smirnov con confiabilidad del 99.9%

Distribución Acumulada Gen. Extreme Value con umbral $D=0.3475$

CH	μ	σ	k	D_α	KS Test
36	0.12402	0.13776	-0.17345	0.17632	ACEPTA
38	0,23855	0,18279	-0,43204	0,0978	ACEPTA
43	0,2356	0,21166	-0,37562	0,12458	ACEPTA

Tabla 10. Prueba Kolmogorov Smirnov con confiabilidad del 99.9%

Distribución Acumulada Logistic con umbral $D= 0.3475$

CH	μ	σ	D_α	KS Test
36	0.18307	0.08111	0.18098	ACEPTA
38	0,28679	0,09433	0,14076	ACEPTA
43	0,29822	0,1114	0,14866	ACEPTA

Tabla 11. Prueba Kolmogorov Smirnov con confiabilidad del 99.9%

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDATE, "Mobile traffic forecasts 2010-2020 report," UMTS Forum, London, UK, 2011.
- [2] Xi Zhang and Hang Su, "Opportunistic Spectrum Sharing Schemes for CDMA-Based Uplink MAC in Cognitive Radio Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, vol. 10, pp.716-730.
- [3] Felipe Sánchez, Giovanni Sagbay, "Estudio y Análisis de la Estandarización y Regulación para la migración del sistema de Radio Analógico al Digital en el Ecuador," Tesis de Maestría, Maestría en Gestión de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2013.
- [4] Cisco. (2015, Feb. 10). Tráfico de datos móviles [Online] Disponible en: http://gblogs.cisco.com/cansac/trafico-de-datos-moviles-crecera-casi-10-veces-en-los-proximos-cinco-anos-predice-estudio-cisco-visual-networking-index-vni/?doing_wp_cron=1458603465.0991768836975097656250.
- [5] SUPERTEL, "Radiodifusión Digital," Don Bosco, Quito, 2012.
- [6] ARCOTEL, "Norma Técnica para el Servicio de Radiodifusión Sonora en Frecuencia Modulada Analógica," Ecuador, 2015, pp. 1-10.
- [7] RDS (2012). Principios Fundamentales de FM [Online]. Disponible en: <http://server-die.alc.upv.es/alumno/rds/RDSfmhw.html>
- [8] UIT, Rec. UIT-R BS.450-3, "Normas de transmisión para radiodifusión sonora con modulación de frecuencia en ondas métricas", 2001, pp.1-6.

- [9] Wikipedia. (2015, Sep.15). Medios de comunicación de Guayaquil [Online].
Disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Medios_de_comunicaci%C3%B3n_de_Guayaquil.
- [10] Wikipedia. (2015, Oct.23). Radio Data System [Online]. Disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Radio_Data_System
- [11] A. Galvis, "Acceso Dinámico al Espectro: Estado Actual, Tendencia y Retos",
Entre Ciencia e Ingeniería, ISSN 1909-8367, 2008, Año 2. No. 4, pp 38-57.
- [12] Mario Torrecillas Rodríguez, "Estudio de mecanismos de acceso dinámico al
espectro en radio cognitiva", Ene. 2011, pp.12-14.
- [13] Miguel López Benítez, Fernando Casadevall; "Spectrum usage in Cognitive
Radio Networks from field measurements to Empirical Models", Spectrum
White Spaces, 2010.
- [14] H. Li, J. Hajipour, A. Attar, V. C. Leung, "Efficient HetNet implementation
using broadband wireless access with fiber-connected massively distributed
antennas architecture", Wireless Communications, IEEE, vol. 18, no. 3, pp.
72– 78, 2011.
- [15] Ian F. Akyildiz; Won-Yeol Lee; Kaushik R. Chowdhury; "CRAHNS: Cognitive
radio ad hoc networks", 2009, vol. 7, pp.810-836.
- [16] Chen, K.-C., Prasad, R, "Cognitive Radio Networks", United Kingdom: Wiley,
2009.
- [17] Neeraj Srivastava, Sharon Hanson; "Expanding Wireless Communication
with White Spaces", White Paper, October 2008.
- [18] Nielsen, "La televisión, Internet y de uso móvil en los EE.UU.," Vol. 8, Junio
de 2010.

- [19] OFCOM. (2011). Considers future of fm radio band [Online]. Disponible en: Media.ofcom.org.uk
- [20] Ed Richards, "Chief Executive of Ofcom," December 2014.
- [21] Microsoft Corp. (2011, Junio 28). TV White Spaces [Online]. Disponible en: <http://www.prnewswire.com/news-releases/se-crea-un-consorcio-para-ensayar-la-tecnologia-tv-white-spaces-124679688.html>.
- [22] Georgina Flesia; "Test de Kolmogorov-Smirnov," Junio 2011.