



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES



“DISEÑO DE UN DETECTOR DE ENERGÍA PARA SEÑALES DE RADIO FM EN RADIO COGNITIVA”

“TESIS DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES”

ELABORADO POR:

Francisco Ricardo Narvárez Romero

DIRECTOR:

Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.

LOJA, ECUADOR

2016

CERTIFICACIÓN

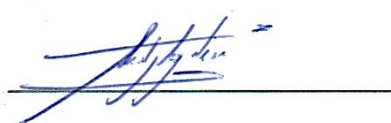
Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en “DISEÑO DE UN DETECTOR DE ENERGÍA PARA SEÑALES DE RADIO FM EN RADIO COGNITIVA”, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, realizado por el señor egresado: **Francisco Ricardo Narváez Romero**, mismo que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 05 de diciembre del 2016



Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc

DIRECTOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo, **FRANCISCO RICARDO NARVÁEZ ROMERO**, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.



FIRMA:

Autor: Francisco Ricardo Narváez Romero.

Cédula: 1900802396

Fecha: 05 de diciembre del 2016

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo, **FRANCISCO RICARDO NARVÁEZ ROMERO**, declaro ser autor de la tesis titulada: “**DISEÑO DE UN DETECTOR DE ENERGÍA PARA SEÑALES DE RADIO FM EN RADIO COGNITIVA**”, como requisito para optar al grado de: **INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los cinco días del mes de diciembre del dos mil dieciséis.

Firma:

Autor: Francisco Ricardo Narváez Romero.

Cédula: 1900802396

Dirección: Zamora (Barrio el Limón, Vía Loja y San Rafael)

Correo Electrónico: fnarvaez@unl.edu.ec

Teléfono: (07) 2-607-639 **Celular:** 0990670857

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Andy Fabricio Vega León, Mg. Sc.

Tribunal de Grado: Ing. John Jossimar Tucker Yépez, Mg. Sc,
Ing. Diego Fernando Carrera Moreno, Mg. Sc.
Ing. Luis Enrique Chuquimarca Jiménez, M. I.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres: Narcisa de Jesús Romero Ortega y José Narváez, quienes me han apoyado incesablemente en todos los sentidos y en los diferentes ámbitos de mi vida, siendo el pilar por el cual hoy en día me encuentro en este punto. Para ellos con mucho amor.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo es el resultado que engloba el esfuerzo de muchas personas, por ello quiero agradecer:

En primer lugar a Dios por ser quien me soporta en los momentos difíciles, por darme la fuerza para continuar a cada paso.

A mis padres y hermanos por brindarme su apoyo incondicional en cada instante de mi vida.

A mis amigos y compañeros, con quienes se ha compartido muchas experiencias a lo largo de toda la etapa académica.

A mi director de tesis por su apoyo y constante esfuerzo por lograr este objetivo.

A los docentes de la Universidad Nacional de Loja quienes han sabido entregar sus conocimientos en beneficio del aprendizaje estudiantil.

TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	II
AUTORÍA	III
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
TABLA DE CONTENIDOS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS	XVI
1. Título.....	1
2. Resumen	2
Abstract	3
3. Introducción.....	4
4. Revisión de literatura	5
4.1. Introducción a las Redes de Radio Cognitiva	5
4.1.1. Antecedentes de Radio Cognitiva.....	6
4.2. Radio Cognitiva	7
4.2.1. Radio Definida por Software.....	7
4.2.2. Concepto de CR.....	8
4.2.3. Características principales de un dispositivo CR.....	9
4.2.3.1. Capacidad Cognitiva [6].....	9
4.2.3.2. Auto-reconfiguración [6].....	9
4.2.4. Ciclo cognitivo	10
4.2.4.1. Observación [5].....	10
4.2.4.2. Orientación [5].....	11
4.2.4.3. Decisión [5]	11
4.2.4.4. Actuación [5]	11
4.2.5. Arquitectura de una CRN.....	12
4.2.5.1. Red Primaria.....	13
4.2.5.2. Red Secundaria	13

4.2.5.3.	Tipos de acceso en una CRN	14
4.3.	Arquitecturas o tipos de CR.....	15
4.3.1.	CR1	15
4.3.2.	Redes de comunicación de próxima generación (xG).....	16
4.3.3.	Radio Cognitiva biológicamente inspirada.....	17
4.3.4.	CORTEKS.....	18
4.3.5.	Adapt4 XG1.....	19
4.3.6.	Agrupación de Espectro (Spectrum Pooling)	20
4.3.7.	CORVUS.....	20
4.4.	Estándar IEEE 802.22 - WRAN	21
4.4.1.	Introducción	21
4.4.2.	Topología.....	22
4.4.3.	Características de las terminales de Usuario.....	22
4.4.4.	Cobertura	22
4.5.	Detección de espectro.....	23
4.5.1.	Introducción.....	23
4.5.2.	Métodos de Detección.....	24
4.5.2.1.	Detector de Energía.....	25
4.5.2.2.	Detector por Filtro Adaptado	27
4.5.2.3.	Detector basado en la Cicloestacionariedad.....	27
4.5.3.	Comparación: Ventajas y desventajas de cada tipo de Detector.....	29
5.	Materiales y métodos	30
5.1.	Materiales	30
5.2.	Métodos.....	30
5.2.1.	Diseño	31
5.2.1.1.	Banco de Señales de Entrada	32
5.2.1.2.	Ruido y Pérdidas	38
5.2.1.3.	Filtrado	42
5.2.1.4.	FFT.....	43
5.2.1.5.	Obtención de la potencia	44
5.2.1.6.	Comparación.....	44
6.	Resultados.....	46
7.	Discusión.....	68

7.1.	Banco de señales de entrada.	68
7.2.	Señales, añadido ruido y pérdidas.	68
7.3.	Evaluación del detector de energía.....	69
7.3.1.	Resultados de señales presentes o ausentes según el análisis del detector para un rango de entre 5Km y 15 Km.....	70
7.3.2.	Resultados de potencia exacta para cada canal según el análisis del detector para un rango de entre 5Km y 15Km.	70
7.3.3.	Fluctuación de Potencia conforme aumenta la distancia en un rango de 1Km a 20Km.	70
7.3.4.	Fluctuación de Potencia conforme varía la temperatura a una distancia de 5Km del transmisor.....	71
7.3.5.	Fluctuación de Potencia conforme varía la temperatura a una distancia de 10Km del transmisor.....	72
7.3.6.	Fluctuación de Potencia conforme varía la temperatura a una distancia de 15Km del transmisor.....	73
8.	Conclusiones.....	74
9.	Recomendaciones.....	76
10.	Bibliografía.....	77
11.	Anexos.....	81
11.1.	Anexo 1. Características técnicas del título habilitante para Radio Municipal de la ciudad de Loja, otorgado por la ARCOTEL.....	81
11.2.	Anexo 2. Lista de Emisoras de radio en la ciudad de Loja según [2]	81
11.3.	Anexo 3. Generación del espectro de dos señales ubicadas en 88.1 MHz (Azul) y 88.3 MHz (rojo), mediante el banco de señales FM diseñado.....	84
11.4.	Anexo 4. Las dos señales del Anexo 3 ampliadas.....	84
11.5.	Anexo 5. Cinco señales de prueba, generadas en distintas frecuencias del espectro FM.	85
11.6.	Anexo 6. Interfaz gráfica de la herramienta FDATool de MATLAB.	85
11.7.	Anexo 7. Intensidades de Campo mínimo a proteger.....	86
11.8.	Anexo 8. Filtrado de una señal utilizando el código fuente obtenido utilizando FDATool.	86
11.9.	Anexo 9. Ampliación del Anexo 8 (Filtro centrado en 95.7MHz).....	87
11.10.	Anexo 10. Ocupación espectral de 54-108MHz en diferentes sectores de la Provincia de Loja según el estudio realizado en [2].	87

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESTRUCTURA DE UNA SDR [6].....	7
FIGURA 2. CICLO COGNITIVO USADO POR J. MITOLA III [7].....	10
FIGURA 3. CICLO COGNITIVO [2].....	11
FIGURA 4. ARQUITECTURA DE UNA CRN [10].....	12
FIGURA 5. RED XG EN UNA BANDA LICENCIADA. [13]	16
FIGURA 6. FUNCIONALIDADES DE UNA ARQUITECTURA DE RED XG [13].	17
FIGURA 7. COMPONENTES CORTEKS. [15].....	19
FIGURA 8. CONCEPTO DE AGUJERO ESPECTRAL [13].	23
FIGURA 9. IMPLEMENTACIÓN DE UN DETECTOR DE ENERGÍA [25].....	31
FIGURA 10. DIAGRAMA DE BLOQUES QUE MUESTRA CADA PASO A SEGUIR PREVIO A LA COMPARACIÓN CON EL UMBRAL.	32
FIGURA 11. RELIEVE DE LA CIUDAD DE LOJA.....	34
FIGURA 12. VISTA DE MAPA DE LA CIUDAD DE LOJA.	35
FIGURA 13. DISTANCIAS MÁXIMAS A TENER EN CUENTA PARA LA EVALUACIÓN DENTRO DEL CASCO URBANO DE LA CIUDAD DE LOJA.	41
FIGURA 14. BANCO DE 100 SEÑALES EN FM (31 ACTIVAS, SEGÚN LA INFORMACIÓN DE LA CIUDAD DE LOJA).	46
FIGURA 15. ESPECTRO DE LAS 100 SEÑALES ATENUADAS POR LAS INTERFERENCIAS A UNA DISTANCIA DE 5KM.	47
FIGURA 16. ESPECTRO DE LAS 100 SEÑALES ATENUADAS POR LAS INTERFERENCIAS A 10KM.	47

FIGURA 17. ESPECTRO DE LAS 100 SEÑALES ATENUADAS POR LAS INTERFERENCIAS A 15KM.	48
FIGURA 18. ESPECTRO DE LAS 100 SEÑALES ATENUADAS POR LAS INTERFERENCIAS A 20KM.	48
FIGURA 19. ATENUACIÓN DEL BANCO DE SEÑALES PARA LAS DISTINTAS DISTANCIAS.	49
FIGURA 20. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA EL CANAL DE LA EMISORA “LUZ Y VIDA FM” DE LA CIUDAD DE LOJA, CONFORME AUMENTA LA DISTANCIA.....	57
FIGURA 21. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA EL CANAL DE LA EMISORA “ONDAS DE ESPERANZA 94.1 FM” DE LA CIUDAD DE LOJA, CONFORME AUMENTA LA DISTANCIA.	57
FIGURA 22. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA EL CANAL DE LA EMISORA “J. C RADIO” DE LA CIUDAD DE LOJA, CONFORME AUMENTA LA DISTANCIA.....	58
FIGURA 23. VARIACIÓN DE POTENCIA OBTENIDA PARA UN CANAL DESOCUPADO EN 88.3 MHZ CONFORME AUMENTA LA DISTANCIA.....	58
FIGURA 24.VARIACIÓN DE POTENCIA OBTENIDA PARA UN CANAL DESOCUPADO EN 97.7 MHZ CONFORME AUMENTA LA DISTANCIA.....	59
FIGURA 25. VARIACIÓN DE POTENCIA OBTENIDA PARA UN CANAL DESOCUPADO EN 107.9 MHZ CONFORME AUMENTA LA DISTANCIA... ..	59
FIGURA 26. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA UN CANAL OCUPADO EN 99.7 MHZ A UNA DISTANCIA FIJA DE 5KM Y CONFORME AUMENTA LA TEMPERATURA.	60

FIGURA 27. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA UN CANAL DESOCUPADO EN 100.7 MHZ A UNA DISTANCIA FIJA DE 5KM Y CONFORME AUMENTA LA TEMPERATURA.	60
FIGURA 28. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 5 KM Y 290 ° K.	61
FIGURA 29. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 5 KM Y 300 ° K.	61
FIGURA 30. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 5 KM Y 309 ° K.	62
FIGURA 31. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA UN CANAL OCUPADO EN 99.7 MHZ A UNA DISTANCIA FIJA DE 10KM, CONFORME AUMENTA LA TEMPERATURA.	62
FIGURA 32. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA UN CANAL DESOCUPADO EN 100.7 MHZ A UNA DISTANCIA FIJA DE 10KM Y CONFORME AUMENTA LA TEMPERATURA.	63
FIGURA 33. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 10 KM Y 290 ° K.	63
FIGURA 34. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 10 KM Y 300 ° K.	64
FIGURA 35. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 10 KM Y 309 ° K.	64
FIGURA 36. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA UN CANAL OCUPADO EN 99.7 MHZ A UNA DISTANCIA FIJA DE 15KM, CONFORME AUMENTA LA TEMPERATURA.	65

FIGURA 37. VARIACIÓN DE POTENCIA PARA UN CANAL DESOCUPADO EN 100.7 MHZ A UNA DISTANCIA FIJA DE 15KM, CONFORME AUMENTA LA TEMPERATURA.	65
FIGURA 38. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 15 KM Y 290 ° K.	66
FIGURA 39. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 15 KM Y 300 ° K.	66
FIGURA 40. HISTOGRAMA REPRESENTATIVO SOBRE RESULTADOS DE OCUPACIÓN A UNA DISTANCIA DE 15 KM Y 309 ° K.	67

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 RESUMEN DE LAS TÉCNICAS PARA DETECCIÓN DE ESPECTRO. [24].....	29
TABLA 2. CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 1 AL 10 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	50
TABLA 3. CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 11 AL 20 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	50
TABLA 4. CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 21 AL 30 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	50
TABLA 5. . CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 31 AL 40 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	51
TABLA 6. CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 41 AL 50 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	51
TABLA 7. CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 51 AL 60 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	51
TABLA 8. CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 61 AL 70 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	52
TABLA 9. CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 71 AL 80 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	52
TABLA 10. CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 81 AL 90 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	52
TABLA 11. . CANALES ACTIVOS Y DESOCUPADOS (DEL CANAL 91 AL 100 DE FM), SEGÚN EL DISEÑO PROPUESTO.....	53
TABLA 12. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 1 AL 10).....	53

TABLA 13. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 11 AL 20).	53
TABLA 14. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 21 AL 30).	54
TABLA 15. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 31 AL 40).	54
TABLA 16. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 41 AL 50).	54
TABLA 17. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 51 AL 60).	55
TABLA 18. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 61 AL 70).	55
TABLA 19. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 71 AL 80).	55
TABLA 20. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 81 AL 90).	56
TABLA 21. VALORES DE POTENCIA OBTENIDOS PARA CADA CANAL A DISTINTAS DISTANCIAS (CANALES DEL 91 AL 100).	56

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

ASAP	Protocolo de Adaptación Automática del Espectro.
BioCR	Radio Cognitiva Biológicamente Inspirada.
BS	Estación Base.
CDMA	Acceso Múltiple por División de Códigos.
CPE	Equipo Terminal de Abonado.
CR	Radio Cognitiva.
CRN	Red de Radio Cognitiva.
CSD	Densidad Espectral Cíclica.
DARPA	Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa.
DSA	Acceso Dinámico al Espectro.
DSAN	Redes de Acceso Dinámico del Espectro.
FM	Frecuencia Modulada.
HMM	Modelo Oculto de Markov.
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IF	Frecuencia Intermedia.
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones.
MAC	Control de Acceso al Medio.
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.
OSSIE	Aplicación de Código Abierto SCA para Sistemas Embebidos.
RF	Radio Frecuencia.
RKRL	Lenguaje de Representación de Reconocimiento de Radio.
SCA	Arquitectura de Software de Comunicación.
SDR	Software Definido por Radio.
SNR	Relación Señal a Ruido.
SR	Software Radio.
UHF	Frecuencias Ultra altas.
VHF	Frecuencias Muy Altas.
WRAN	Red Inalámbrica de Área Regional.

1. Título

**“DISEÑO DE UN DETECTOR DE ENERGÍA PARA SEÑALES DE
RADIO FM EN RADIO COGNITIVA”**

2. Resumen

La presente tesis muestra el diseño de un detector de energía, el cual está destinado a tomar medidas del espectro de radio FM en la ciudad de Loja y mediante esto tener la base para un futuro diseño de un sistema de transmisión de Radio Cognitiva (CR, por sus siglas en inglés).

Para la ejecución del trabajo se requiere de diferentes medios, uno de ellos es el análisis bibliográfico de las distintas opciones que existen aparte de este tipo de detector. Adicional a esto se tiene la revisión de diferentes conceptos como la Radio Definida por Software (SDR, por sus siglas en inglés), que es la base de la CR.

La herramienta informática utilizada para lograr el diseño propuesto es MATLAB. Los datos de medición espectral son tomados de estudios anteriormente realizados dentro en la misma ciudad de Loja.

Al término del trabajo, se obtiene una visión del comportamiento del detector con señales reales, permitiendo conseguir datos en cuestión de minutos frente a todo el tiempo que llevaría hacerlo en un ambiente real.

Abstract

The present thesis shows the design of an energy detector, which is addressed to measure the Spectro of the radio FM in Loja city; so, it could be the base to design a future broadcasting of Cognitive Radio (CR).

To develop the work, different means have been required, one of them is the bibliographic analysis of the diverse options that exist apart from this type of detector. Moreover, the revision of different concepts like the Software Defined Radio (SDR); which is the base of CR, was done.

The computing tool used to develop the proposed design is MATLAB (R2013a). The data of the spectral measure are taken from researches done before in the same city of Loja.

At the end of the work, is obtained a sight of the behavior that would have the detector with real signals, allowing you to get data in minutes compared to all the time it would take to do it in a real environment.

3. Introducción

En la actualidad los sistemas de comunicaciones inalámbricas sufren quizá uno de los mayores problemas desde sus inicios, la saturación espectral [1]. Como medida provisional en diversos países como en el caso del Ecuador, se opta por otorgar el espectro mediante concursos entre los diferentes postulantes a la porción de espectro que se encuentra disponible.

Estudios recientes, realizados tanto por el Ing. Andy Fabricio Vega León en 2011, así como por el Ing. Edison Darío Troya Chanta en el 2015, arrojan resultados, por una parte negativos; pero que abren la posibilidad a tecnologías nuevas como es el caso de Radio Cognitiva.

Se habla de resultados negativos porque al revisar las mediciones espectrales se observa que a pesar de la ocupación espectral, la utilización de estas bandas de frecuencias es deficiente llegando a estar libres hasta más del 50% del tiempo en el cantón Loja [2]. Así mismo el estudio realizado por el Ing. Edison Troya señala que para la banda FM en la ciudad de Loja existe alrededor del 70% de espectro disponible.

Estos datos pueden abrir paso al desarrollo de sistemas de CR, que actualmente se encuentran en estudio y que además se realizan en etapas. La primera y principal de estas etapas es la detección, mediante la cual se entrega la información necesaria al dispositivo CR para poder iniciar una transmisión.

Dentro de los sistemas de detección se hallan diferentes posibilidades, siendo la detección de energía el método más asequible debido a la poca información requerida de la señal primaria y por lo tanto el tema de estudio de esta tesis.

4. Revisión de literatura

4.1. Introducción a las Redes de Radio Cognitiva

El despliegue de la tecnología ha venido desarrollándose a un ritmo acelerado y presentando cambios significativos. Hablamos por ejemplo del paso de los sistemas de radio analógicos a digitales, obteniéndose con esto un gran avance en este campo. Posteriormente se habla de la Radio Definida por Software (SDR¹, por sus siglas en inglés), descrita en [1].

En telecomunicaciones, se puede encontrar sistemas cableados e inalámbricos; más allá del desarrollo de los sistemas cableados y dejando de lado estos, se hace referencia al problema fundamental en las redes inalámbricas, que es la saturación del espectro radioeléctrico. Esto se debe a la distribución del espectro hecha por los organismos institucionales de cada país, es decir que las bandas para ser asignadas son escasas y sobre todo las de frecuencias debajo de los 3 GHz; pero aparte de esto las bandas asignadas no se explotan de manera eficiente.

Los estudios del espectro realizados hasta el momento, exhiben que la ocupación del mismo aparenta alcanzar aproximadamente un 14% de forma regular, no así en condiciones emergentes o desastres, donde dicha ocupación puede llegar al 100% en períodos de tiempo cortos [3].

Además de la saturación del espectro, las bandas ocupadas son usadas muy por debajo de su capacidad, tal como se menciona en el párrafo anterior, produciéndose lo que se conoce como “*espacios en blanco*” (white spaces²).

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente nace la tecnología conocida como CR³, orientada a resolver el problema de saturación del espectro, aprovechando la subutilización del mismo. Es decir usuarios sin licencia pueden utilizar las bandas ocupadas, siempre que no causen interferencia a sus titulares.

¹ SDR: Término definido en el siguiente capítulo del presente documento.

² White spaces: Frecuencias que se encuentran reservadas para el uso sin licencia, por lo general se tratan de frecuencias de televisión que es donde se estudia los sistemas de radio cognitiva.

³ CR: Tecnología que define una radio “autoconsciente”, misma que se analiza en el siguiente capítulo del presente documento.

4.1.1. Antecedentes de Radio Cognitiva.

Como se describió anteriormente las necesidades tecnológicas de la sociedad, requieren de innovación en los sistemas de telecomunicaciones, lo que conlleva al aumento de la demanda del espectro en los sistemas inalámbricos. Es decir que existe una alta demanda del espectro radioeléctrico frente a una capacidad al parecer limitada.

Según [3] los estudios realizados reflejan que existe un uso ineficiente del espectro, lo mismo que ha llevado a buscar soluciones. El concepto de CR nace en respuesta a este problema hace poco más de una década como lo menciona [4]:

“Múltiples campañas de mediciones revelan que gran parte del espectro con licencia sigue sin utilizarse, tanto en tiempo como en frecuencia: el tráfico en las redes inalámbricas tiende a ser a ráfagas.”

Debido a las campañas de medición que dieron los resultados de la ineficiente utilización del espectro, se iniciaron estudios sobre las posibles soluciones a este inconveniente que afecta globalmente a las telecomunicaciones.

Los pioneros en la investigación de CR fueron Mitola y Maguire en 1999 mediante su trabajo seminal. Así también se tiene los estudios de medición espectral que se llevaron a cabo en 1995, cuyo objetivo era cuantificar el uso del espectro en bandas con licencia al igual que las que no poseen la misma. En los Estados Unidos la investigación para CR se concentró en el Acceso Dinámico del Espectro (DSA⁴, por sus siglas en inglés) y el uso secundario del espectro como puntos fundamentales [3].

Posteriormente se habla de la radio definida por software [1], misma que constituye la base de los sistemas de CR y que se describe más adelante.

⁴ DSA (Dynamic Spectrum Access, Acceso Dinámico al Espectro): Conjunto de técnicas que están siendo investigadas y desarrolladas para mejorar el rendimiento en las redes de comunicaciones.

4.2. Radio Cognitiva

4.2.1. Radio Definida por Software

Desde hace ya varios años se ha venido desarrollando la tecnología a un ritmo acelerado. Dentro de esta, los sistemas de telecomunicaciones han avanzado y se han desplegado de una manera trascendental.

Una de las evoluciones más significativas en las tecnologías de radio ha sido la creación de la SDR, donde los parámetros de modulación, codificación, demodulación etc., pueden ser modificados dependiendo del entorno de radio, todo esto mediante software [5].

Inicialmente esta tecnología se definió como Software Radio (SR, por sus siglas en inglés) en donde se tiene equipos “que con un elemento hardware, pueden realizar en distintos instantes de tiempo diferentes funciones con sólo variar la configuración mediante software.” [5].

De esta manera, no es posible construir un equipo SR ideal teniendo en cuenta la realidad de la tecnología actual; entonces nace SDR como una versión de SR que puede ser implementada.

Básicamente en [5] se entrega el concepto de SDR como: “Radio en la cual algunas o todas funciones de la capa física son definidas por software”

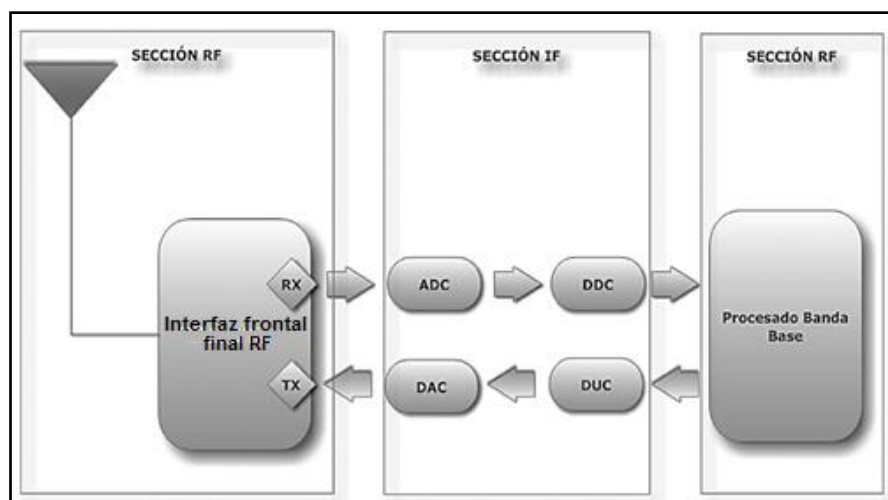


Figura 1. Estructura de una SDR [6].

Tal como se muestra en la figura 1, la recepción y la transmisión de las señales se realiza en la etapa de Radio Frecuencia (RF, por sus siglas en inglés). En Recepción las señales se adecúan y convierten a frecuencia intermedia. Para la transmisión las señales de Frecuencia Intermedia (IF, por sus siglas en inglés) se modulan y amplifican antes de ser enviadas [6].

4.2.2. Concepto de CR

“Una Radio cognitiva (CR, por sus siglas en inglés) es una radio que puede cambiar sus parámetros de transmisión basada en la interacción con el medio ambiente en el que opera” [4].

El párrafo anterior representa la idea básica de una CR, en la que se hace referencia a una radio que interactúa con el medio ambiente o aprende del mismo.

Una de las definiciones más conocidas es la introducida por Joseph Mitola III en su tesis doctoral, en la que describe lo siguiente:

“Radio Cognitiva es una radio que emplea el razonamiento basado en modelos para alcanzar un determinado nivel de competencia en los ámbitos relacionados con la radio” [7].

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, por sus siglas en inglés) también presenta una definición para esta tecnología:

“Una radio o un sistema que detecta y es consciente de su entorno operativo y en consecuencia puede ajustar sus parámetros de funcionamiento de manera dinámica y autónoma” [8].

Otro concepto a tener en cuenta es el de S. Haykin en [9], en el que hace referencia a una radio consiente del entorno, que puede cambiar sus parámetros en tiempo real y sobre todo está orientada a ofrecer una comunicación fiable y eficiente espectralmente:

“Radio capaz de ser consciente de su entorno, aprender y adaptativamente cambiar sus parámetros de funcionamiento en tiempo real con el objetivo de proporcionar en cualquier momento y en cualquier lugar, y una comunicación fiable espectralmente eficiente”.

Existen varias definiciones para Radio Cognitiva, todas ellas con similitud y relación; pero en esencia todas ellas apuntan a lograr una correcta utilización del espectro mediante capacidades cognitivas, para ofrecer una información de calidad al usuario. Referente a esto en [4] se menciona:

“El concepto de CR hace hincapié en una mayor calidad de la información y la experiencia para el usuario, con capacidades de cognición y reconfiguración como un medio para este fin”.

4.2.3. Características principales de un dispositivo CR

Se definen dos características principales de los dispositivos CR, teniendo en cuenta la base del concepto introducido por Joseph Mitola III en su tesis doctoral, dichas características son [6]:

4.2.3.1. Capacidad Cognitiva [6]

“Tecnología necesaria para capturar la información de su entorno de radiofrecuencia e identificar las partes del espectro que no estén siendo utilizadas”.

Entendiéndose esto como la interacción con el entorno en tiempo real, necesaria para determinar los espacios libres y así poder adaptarse al mismo entorno, estableciendo los parámetros de funcionamiento adecuados.

4.2.3.2. Auto-reconfiguración [6]

“Tecnología necesaria para que el dispositivo pueda variar, de manera dinámica, distintos parámetros relacionados con la transmisión o recepción (frecuencia, potencia, modulación, etc.), de acuerdo con su entorno”.

Esto se entiende como la capacidad de CR para establecer nuevamente sus parámetros o cambiarlos de acuerdo a los requerimientos del entorno que naturalmente será cambiante, esto sin modificar los componentes de hardware; es decir solo se hace mediante el software.

4.2.4. Ciclo cognitivo

Según J. Mitola III en [7], se mencionan 9 niveles de funcionalidad para radio cognitiva que van desde el 0 hasta el 8, llegando así hasta una compleja radio auto-consciente. Estos niveles se representan en la figura 2 que se muestra a continuación:

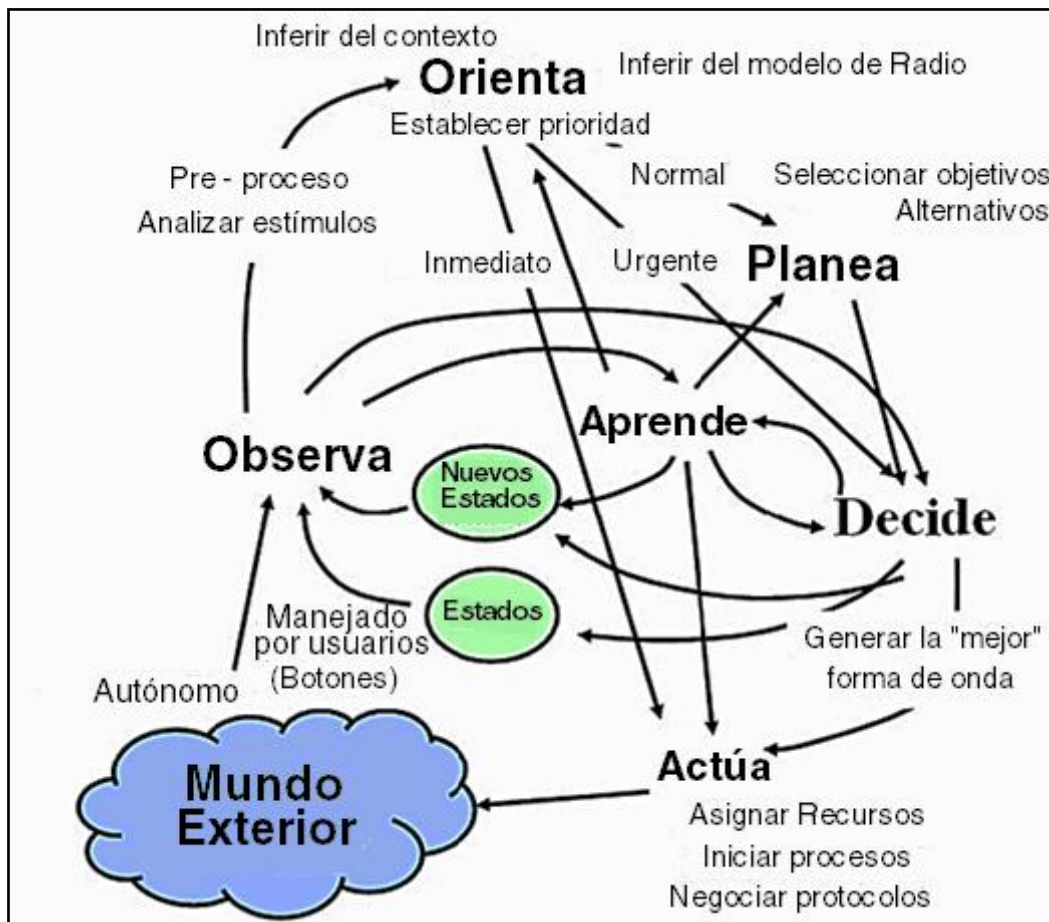


Figura 2. Ciclo cognitivo usado por J. Mitola III [7].

Esto se puede resumir, de manera que el ciclo cognitivo se desarrolle en cuatro fases que se resumen a continuación [5]:

4.2.4.1. Observación [5]

En esta fase se verifica el ambiente de radio, es decir constituye la etapa de la detección, con lo que se pueden localizar aquellas bandas del espectro, propiedad de los usuarios primarios, que no se estén utilizando en un determinado instante de tiempo.

4.2.4.2. Orientación [5]

En esta fase se analizan las bandas libres que se han detectado, las cuales constituyen los espacios en blanco que serán utilizados para las transmisiones por parte de los usuarios secundarios. Además en esta fase se pueden extraer los parámetros de transmisión de las bandas detectadas.

4.2.4.3. Decisión [5]

Luego de obtener los resultados de las dos fases anteriores se tendrá que hacer una comparación de todas las bandas disponibles y decidir cuál de ellas es la más apropiada para la transmisión que se debe realizar.

4.2.4.4. Actuación [5]

En esta fase se lleva a cabo la transmisión; pero debido a que el ambiente de radio es cambiante, es decir que por la naturaleza misma de radio cognitiva puede aparecer en cualquier momento un usuario primario, el cual tiene preferencia sobre el usuario de CR, en este caso se debe estar preparado para actuar en cualquier momento, conformándose así un ciclo.

En la siguiente imagen se puede observar el ciclo tomando en cuenta las tres primeras fases:

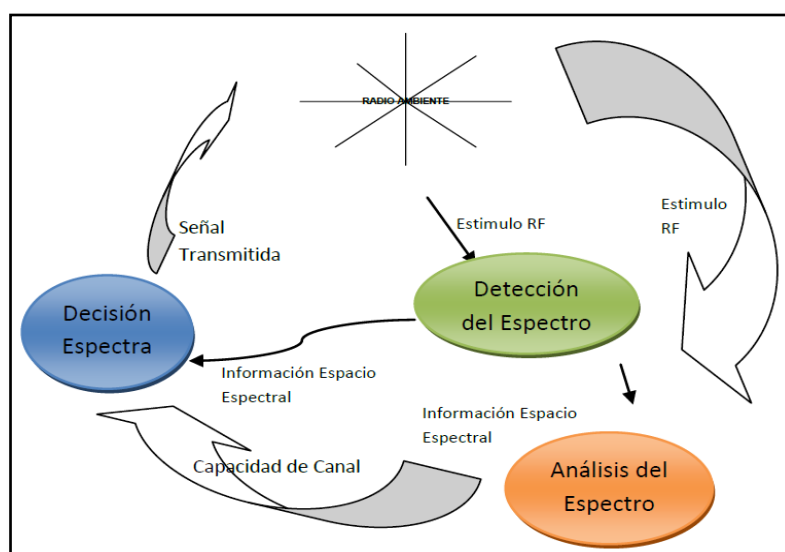


Figura 3. Ciclo cognitivo [2].

4.2.5. Arquitectura de una CRN⁵

A continuación se presenta la arquitectura de un Red de Radio Cognitiva (CRN, por sus siglas en inglés), en la que se puede diferenciar la red primaria y la secundaria propia en este tipo de diseño.

“Existen arquitecturas de redes inalámbricas que emplean heterogeneidad en términos de política de espectro y de tecnologías de comunicación” [10].

El párrafo anterior hace referencia a las políticas de asignación de espectro, que actualmente se encuentran en estudio para lograr obtener una mayor eficiencia en el uso del espectro, teniendo en cuenta que existen diferentes tecnologías, de diferentes fabricantes y diferentes estándares.

Además de esto se suma el hecho de que las bandas asignadas poseen licencia; pero se considera que no se usan eficientemente como se mencionó anteriormente en este documento.

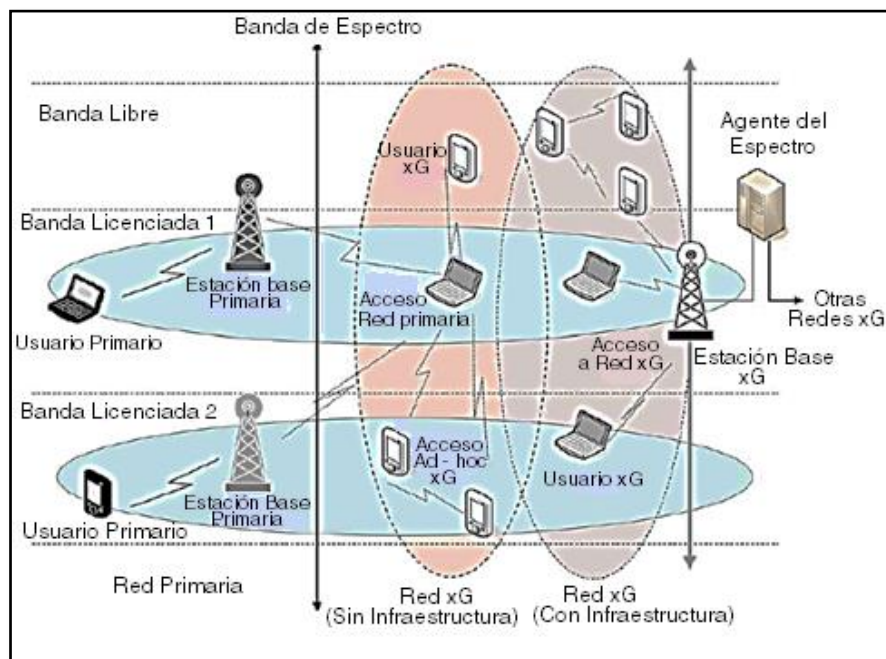


Figura 4. Arquitectura de una CRN [10].

⁵ CRN (Cognitive Radio Network, Red de Radio Cognitiva): Red de radio cognitiva, considerado como un enfoque innovador en el que las radios están diseñados con un nivel de inteligencia, permitiendo así el uso del espectro de nuevas formas.

4.2.5.1. Red Primaria.

La red primaria, es aquella que cuenta con licencia, que le otorga el derecho único de una banda del espectro; es decir que esta banda es de uso exclusivo de los usuarios de dicha red. Los componentes de esta red se muestran en la figura 4 y se describen a continuación:

➤ Usuario Primario (Primary User)

Es el usuario de la red primaria, por lo tanto cuenta con una licencia que le otorga el derecho a una banda de frecuencias del espectro y no necesita alguna función adicional para operar.

“Este acceso sólo puede ser controlado por la estación base primaria y no debe verse afectado por usuarios que operen sin licencia” [10].

Es decir que el usuario primario cuenta con todas las garantías de disponibilidad de espectro y debe estar libre de interferencias, los usuarios secundarios descritos más adelante podrán operar siempre que no interfieran con los primarios.

➤ Estación base primaria (Primary Base-station)

Es un equipo o componente de infraestructura al que le corresponde una banda de frecuencia de trabajo ya que posee licencia, además la estación base primaria no tiene capacidades cognitivas. “Sin embargo, la estación base principal o primaria solicitará a ambos la licencia y el protocolo CR para la red de acceso primaria para los usuarios secundarios” [10].

4.2.5.2. Red Secundaria

Esta red a diferencia de la primaria no posee licencia para operar en una banda de frecuencias. Entonces este tipo de red permite un acceso oportunista [10].

Un dato importante de este tipo de redes es que según se muestra en la figura 4, pueden desplegarse como redes ad-hoc o como una infraestructura de red.

➤ **Usuarios CR**

Son los usuarios secundarios, los cuales no poseen licencia para operar en una determinada banda de frecuencias y a diferencia de los primarios requieren de funciones adicionales para acceder a una banda del espectro en la que se necesita operar.

➤ **Estación Base CR (xG Base-station)**

Lógicamente es la estación base secundaria, sin licencia que únicamente establece conexión con los usuarios secundarios, los cuales tampoco poseen licencia; permitiendo el acceso de los mismos a otras redes [10].

➤ **Agente del espectro**

“Agente del espectro es una entidad central de la red que juega el papel de la distribución de los recursos del espectro entre las diferentes CRN” [10].

Considerando lo descrito anteriormente, se puede decir que el agente del espectro permite la “coexistencia entre múltiples CRN” [10].

4.2.5.3. Tipos de acceso en una CRN

Según la figura 4, en la CRN se distinguen tres tipos de acceso descritos a continuación:

➤ **Acceso CRN**

Los usuarios CR (secundarios) acceden a su propia estación base (estación base CR) en una banda que puede ser con licencia o sin ella. “De esta manera la normativa de compartición del espectro puede ser independiente de la red primaria, debido a que todas las interacciones ocurren dentro de la CRN [10].

➤ **Acceso Ad-hoc CR**

En este tipo de acceso los usuarios CR se comunican con otros usuarios CR, esta comunicación puede ser en una banda con licencia así como sin licencia [10].

➤ Acceso Red Primaria

“En este tipo de red los usuarios CR (secundarios) pueden acceder a la estación base principal a través de una banda licenciada” [10].

En este caso los “usuarios CR requieren de un protocolo de control de acceso al medio adaptativo (MAC, Medium Access Control)” [10], este protocolo permite la comunicación inalámbrica utilizando tecnologías de acceso variadas y por medio de una gran cantidad de redes.

4.3. Arquitecturas o tipos de CR

A continuación se describen, de manera corta, algunos tipos de implementaciones o arquitecturas de CR realizadas por Instituciones de educación superior, así como por entes gubernamentales.

Lo siguiente es un breve resumen que proporciona una idea básica de cada una de las arquitecturas seleccionadas, para una revisión en detalle de cada una de las mismas se puede dirigir a las referencias citadas al final del documento.

4.3.1. CR1

Lógicamente recibe esta designación por ser el primer prototipo de investigación de CR [11].

CR1 demostró los principios de la Radio Cognitiva y contribuyó para poder describir la arquitectura de la misma. Esta es una arquitectura de CR desarrollada por J. Mitola, en el que utiliza el Lenguaje de Representación de Reconocimiento de Radio (RKRL⁶, por sus siglas en inglés) para determinar las adaptaciones de radio. Este lenguaje representa el conocimiento de radio de un conjunto de lenguajes naturales y modelos basados en computador [12].

Es decir que básicamente CR1 tenía como propósito probar RKRL y los conceptos iniciales de la Radio cognitiva, lo cual llevó a la formulación de la misma.

⁶ RKRL: Lenguaje que aprende a distinguir una característica del medio natural que no coincide con el medio natural; es decir tiene un cierto grado de inteligencia.

Tal como los describe Mitola en [7], el hecho de utilizar técnicas de aprendizaje hace que el software-radio se pueda entrenar en un sentido amplio y no solo sea programable.

CR1 integra algunos aspectos importantes como el procesamiento digital de señales, procesamiento de voz, entre otros [7].

4.3.2. Redes de comunicación de próxima generación (xG)

Es el enfoque de DARPA⁷ en Redes de Acceso Dinámico al Espectro (DSAN, por sus siglas en inglés). “Este programa tiene como objetivo poner en práctica las políticas basadas en radios inteligentes, conocidas como radios cognitivas” [13].

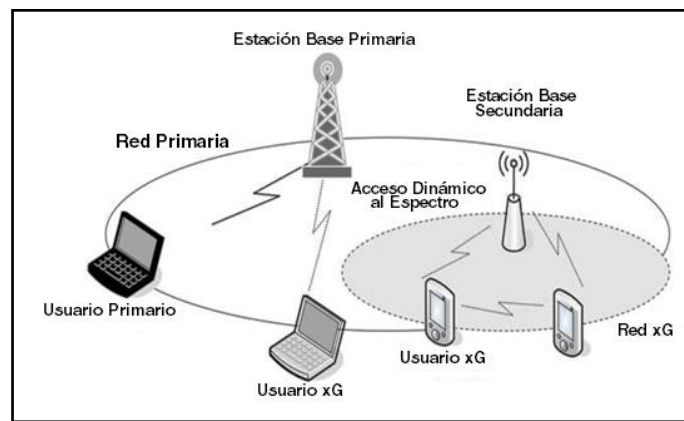


Figura 5. Red xG en una banda licenciada. [13]

Con esto se pretende que los usuarios móviles cuenten con un gran ancho de banda mediante arquitecturas inalámbricas heterogéneas y técnicas de acceso dinámico al espectro.

En [13] se describen las principales características de radio cognitiva en redes xG, dichas características son:

➤ **Detección de Espectro (Spectrum Sensing)**

Consiste en detectar el espectro que no se está utilizando para compartirlo sin causar interferencias perjudiciales para otros usuarios.

⁷ DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa): Agencia del Departamento de Defensa de Estados Unidos, responsable de desarrollar nuevas tecnologías para uso militar.

➤ **Gestión del Espectro (Spectrum Management)**

Consiste en capturar el mejor espectro disponible del que se ha detectado para poder satisfacer las necesidades de comunicación por parte de los usuarios.

➤ **Movilidad del Espectro (Spectrum Mobility)**

Consiste en que al momento de “saltar” a un espectro de mejores características para la comunicación, se debe garantizar el mantenimiento de las condiciones de la misma.

➤ **Compartir el Espectro (Spectrum Sharing)**

Consiste en proporcionar la cantidad de espectro justo entre los usuarios que coexisten mediante la red xG.

Estas cuatro funcionalidades y su relación con cada capa se presentan a continuación:

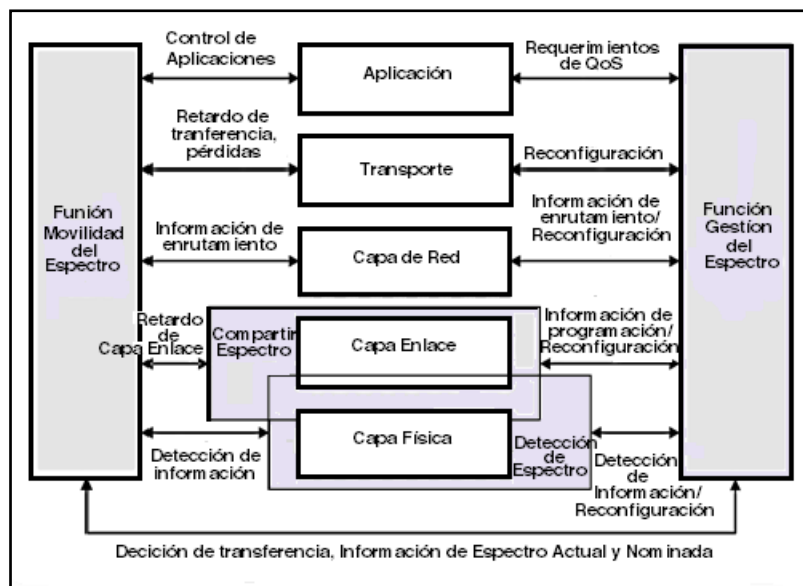


Figura 6. Funcionalidades de una arquitectura de red xG [13].

4.3.3. Radio Cognitiva biológicamente inspirada

Descrita en la tesis doctoral de Christian Rieser [14] en donde se construye un modelo oculto de Markov (HMM)⁸ del entorno en base a mediciones del canal.

⁸ HMM (Modelo Oculto de Markov, Hidden Markov Model): Modelo estadístico en el que se pretende determinar parámetros desconocidos a partir de parámetros observables.

Los resultados del modelo son utilizados por un algoritmo genético para predecir el rendimiento según las condiciones del canal con diferentes combinaciones de componentes [12].

La investigación de Rieser [14], está centrada en el desarrollo de una CR que funcione de manera fiable en entornos de comunicaciones que sufran imprevistos, como es el caso de emergencias o desastres.

En este trabajo se presenta una estructura y proceso para incorporar la cognición en un radio, “incluyendo la discusión de la forma en que el mecanismo se deriva del proceso de aprendizaje humano y asigna a un formalismo matemático llamado el BioCR” [14].

Este tipo de CR constituye un trabajo muy interesante y extenso, para una comprensión en detalle se puede dirigir a [14].

4.3.4. CORTEKS

Implementada en la Universidad de Virginia Tech, en esta arquitectura se usa un computador personal que aprovecha la aplicación SCA⁹ OSSIE¹⁰ de la misma universidad, así como los equipos de prueba de *Tektronix* tal como se describe en [15]:

- Un generador de forma de onda arbitraria AWG 430, para crear un transmisor multimodo.
- Analizador de la lógica - se utiliza para la caracterización de la señal (la identificación de patrones de bits, protocolos, etc.).
- Analizador de espectro en tiempo real RSA3408, utilizado para la realizar la demodulación de la señal.

⁹ SCA (Software Communications Architecture, Arquitectura de Software de Comunicación): Arquitectura abierta de referencia que dice a los diseñadores como los elementos de hardware y software funcionan en armonía dentro de un SDR.

¹⁰ OSSIE (Open Source Implementación SCA Implementation for Embedded-Systems, Aplicación de Código Abierto SCA para Sistemas Embebidos): Primera aplicación de código abierto C++ basada en SCA.



Figura 7. Componentes CORTEKS. [15]

La radio CORTEKS actúa como un usuario secundario empleando en este caso redes neuronales para determinar la presencia de usuarios primarios, de esta manera adapta su frecuencia y modulación evitando las interferencias con los usuarios primarios [12].

4.3.5. Adapt4 XG1

Según [16] la empresa *Adapt4* es la primera en desarrollar y comercializar un sistema de CR, el cual lleva por nombre XG1. La intención de XG1 es operar como un dispositivo de espectro secundario.

Como principales características del equipo se mencionan en [16]:

- Inicialmente opera en la banda de 217 a 220 MHz.
- La información se transmite en 45 radiocanales de 4Kbps.
- Utiliza un protocolo patentado ASAP11.

Esta radio utiliza un algoritmo propietario conocido como ASAP, mediante el cual se puede escoger parámetros (para evitar interferencias perjudiciales a los usuarios primarios) como selección dinámica de frecuencia, salto de frecuencia, control de potencia de transmisión donde sea posible [15].

¹¹ ASAP (Automatic Spectrum Adaptation Protocol, Protocolo de Adaptación Automática del Espectro): Protocolo que permite una selección dinámica de los parámetros de transmisión en XG1.

XG1 se ajusta a la expresión “Cognitive Radio”. Básicamente en XG1 se permite (mediante ASAP) que todos los radios cognitivos dentro de la red XG1 monitoreen la actividad de otros usuarios en una banda específica, de tal manera que puedan detectar el ancho de banda que no se está utilizando para poder transmitir a través de ellos. Cuando se detecta el retorno de un usuario con licencia, se deja de transmitir en esa frecuencia hasta que esté disponible nuevamente [6].

4.3.6. Agrupación de Espectro (Spectrum Pooling)

Esta arquitectura representa la existencia paralela de dos sistemas de radio móviles dentro de las mismas frecuencias. Esto haciendo honor a la idea básica de radio cognitiva que consiste en utilizar el espectro disponible no usado por los usuarios licenciados, esto sin causar interferencias perjudiciales.

En este sistema se agrupa los rangos espectrales de diferentes propietarios en un fondo común, de manera que este nuevo sistema de radio funcione de forma superpuesta al sistema de radio con licencia, mejorando la eficiencia espectral [17].

Esta arquitectura usa Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM¹², por sus siglas en inglés), la ventaja que presenta es que se puede dejar un grupo de subportadoras sin modular [12], esto es conveniente debido a que esas subportadoras pueden estar siendo utilizadas por usuarios primarios.

Para la detección se utiliza tramas de detección enviados por la estación base, los usuarios de Radio Cognitiva (CR, por sus siglas en inglés) realizan la detección, esta información de la localización es recogida por la estación base [16].

4.3.7. CORVUS

CORVUS se presenta como una visión de radio cognitiva enfocada a utilizar un espectro sin licencia virtual, de manera que esto no restrinja los privilegios con los que cuentan los titulares de las licencias originales [18].

¹² OFDM: Técnica basada en FDM donde cada subportadora es ortogonal al resto, permitiendo que sus espectros se traslapen sin causar interferencia, aumentando la eficiencia.

Básicamente en esta arquitectura los usuarios sin licencia se agrupan en grupos de usuarios secundarios. En los cuales, cada uno de sus miembros debe analizar el espectro [16].

CORVUS trabaja desde los MHz hasta los GHz, en donde se crea una banda virtual no licenciada y dentro de la misma, canales lógicos. Un canal utilizado para la coordinación entre grupos y el otro para el intercambio interno de información [12].

Existen muchas otras arquitecturas o tipos de Radio Cognitiva, mismas que se mencionan en la bibliografía presentada al final del presente documento. En [12] se mencionan muchas de ellas de una manera resumida, para un estudio en detalle se puede dirigir a las referencias.

4.4. Estándar IEEE 802.22 - WRAN¹³

4.4.1. Introducción

Con el estudio y desarrollo de los sistemas cognitivos, se hace necesaria la creación de un estándar que oriente y regule esta tecnología en crecimiento.

En virtud a lo mencionado anteriormente el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés) se inició en la búsqueda de un estándar que presente las pautas para esta tecnología. De esta manera en el año 2011 se aprueba el 802.22 que también se lo conoce como WRAN [19].

En términos generales el IEEE 802.22 es un estándar para WRAN el cual está orientado a utilizar los espacios en blanco en el espectro de los canales de TV, lógicamente esto es empleando sistemas de Radio Cognitiva.

El desarrollo del presente estándar maneja como uno de sus principales objetivos evitar las interferencias a los servicios de TV, micrófonos inalámbricos, sistemas de seguridad pública [19]. Esto debido a los sistemas CR en lo que se maneja una red funcionando paralelamente a una red con licencia.

¹³ WRAN (Wireless Regional Area Network, Redes inalámbricas de Área Regional)

4.4.2. Topología

WRAN opera basado en accesos inalámbricos fijos, los cuales se proveen por una estación base (BS, por sus siglas en inglés). Estas estaciones son las que controlan las características RF de los usuarios terminales. Entonces según la distribución que se maneja se habla de una red Punto-multipunto en la que la BS¹⁴ transmite a varios CPE¹⁵ y los mismos responden a la estación base.

La estación base maneja la “*percepción distribuida*”, la cual es necesaria para asegurar que el espectro de televisión se use de la manera correcta, de tal manera que no se produzcan interferencias con el espectro que se encuentra en uso por los usuarios primarios [2].

4.4.3. Características de las terminales de Usuario

En [19] se muestran algunas características que presentan los terminales de usuario:

- Deben estar disponibles como un producto en cualquier tienda electrónica.
- No es necesario que estén debidamente licenciados ni tampoco deben estar registrados.
- Deben poseer la capacidad de poder detectar las interferencias.

Además se pueden instalar por conexiones simples a:

- Una antena UHF y/o VHF
- A una computadora (Puede ser a través de medios cableados por un conector Ethernet o mediante acceso inalámbrico)
- A un toma corriente.

4.4.4. Cobertura

El estándar IEEE 802.22 – WRAN especifica que el rango de cobertura de la estación base es de hasta 100 Km, lo cual es muy favorable por la gran área que se puede cubrir; pero se debe tener en cuenta las interferencias que se podrían producir.

¹⁴ BS (Base Station, Estación Base)

¹⁵ CPE (Customer Premise Equipment, Equipo Local de Cliente)

Entonces presenta un rango de cobertura amplio, tomando en cuenta que la potencia no sea un problema [2].

A esto se le puede agregar la velocidad media que presenta el estándar, la cual es 18 Mbps para un canal de 6 MHz que es un canal de televisión.

4.5. Detección de espectro

4.5.1. Introducción

Como se ha descrito anteriormente el ciclo cognitivo comprende varias etapas, la primera, que es fundamental, es la detección, ya que mediante la misma se puede conocer la existencia de un usuario primario y si se encuentra o no transmitiendo.

La detección es la etapa fundamental, mediante la cual se identifican los espacios libres del espectro, aquellos que no están siendo utilizados por los usuarios con licencia, de tal manera que estos espacios sean aprovechados por la tecnología de radio cognitiva mediante un acceso dinámico del espectro.

En la figura 8 se muestra una gráfica donde se identifican el espectro utilizado y los “*Agujeros espectrales*” mediante los cuales se puede aumentar la eficiencia del espectro con técnicas DSA.

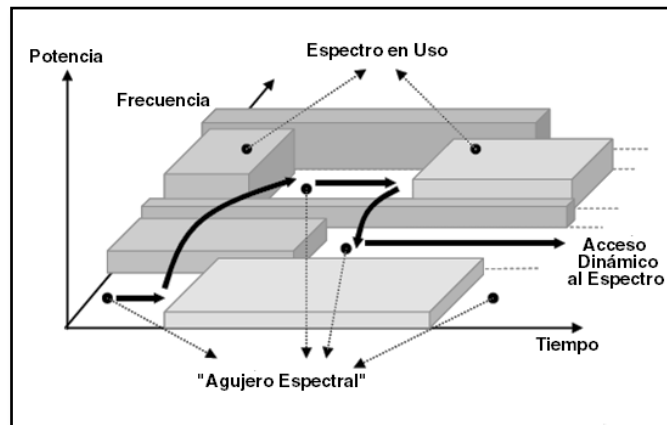


Figura 8. Concepto de agujero espectral [13].

De la misma manera mediante esta etapa, dependiendo del método utilizado se conocerá las características de la señal en mayor o menor grado, empleando así mismo más o menos coste computacional.

Muchos autores describen que para una óptima funcionalidad de los sistemas de CR es necesaria la utilización de varias dimensiones interactuando unas con otras [20].

En este sentido describen la utilización en conjunto de dimensiones como el tiempo, frecuencia, códigos, ángulo, espacio geográfico. Esto sin duda conllevará una mayor eficiencia de los sistemas; pero el coste computacional y la complejidad en el diseño se elevan de la misma manera.

Más allá de esto, para el presente trabajo solo se requerirá el manejo de dimensiones como la frecuencia y el tiempo, ya que el detector de energía maneja los mismos.

4.5.2. Métodos de Detección

En CR se habla de una distribución jerárquica de las técnicas empleadas en la detección de espectro, Según [20] estas son:

- Técnicas fundamentales (detección de energía, filtro adaptado y características ciclo-estacionarias),
- Técnicas basadas en las fundamentales o evolución (detección de forma de onda, identificación del radiotransmisor, detección de la potencia de fuga en el receptor)
- Técnicas alternativas típicas del análisis de imágenes (transformada Hough y Wavelet)

En realidad como se menciona en el párrafo anterior, el segundo y tercer punto muestran las técnicas que se basan en las fundamentales, de esta manera en mayor o menor grado estas técnicas utilizarán las fundamentales para su desarrollo y funcionamiento. Para el desarrollo del presente trabajo se toma en cuenta las fundamentales ya que son las más conocidas y sobre todo porque es mediante el detector de energía con el que se pretende trabajar.

A continuación se presentan los tipos de detectores de espectro más comunes, estos son los fundamentales, estableciendo una síntesis de sus características, mostrando así las ventajas y desventajas que puede tener el uso e implementación de cada uno.

4.5.2.1. Detector de Energía

Se lo reconoce como el detector más utilizado, debido principalmente a su baja complejidad computacional. Así mismo se lo considera como menos óptimo comparándolo con otros ya que básicamente depende un umbral.

El punto fuerte de este tipo de detector es que no requiere conocer a fondo la información de la señal de usuario primario; es decir que no se requiere conocer parámetros como la modulación, a diferencia de otros que si lo requieren, tal como se describe en [21].

El proceso para la detección de energía, según [22] sigue la siguiente secuencia:

- La señal de entrada pasa por un filtro paso banda.
- El módulo de la señal resultante se eleva al cuadrado y se integra en un intervalo de tiempo.
- Luego el resultado se compara con el umbral preestablecido para establecer la presencia o ausencia de un usuario primario.

En esencia el detector de energía es uno de los más utilizados por su factibilidad a la hora de implementar y por su bajo coste computacional, pero depende de un umbral el cual según [22] se lo considera como punto crítico del sistema ya que es susceptible a los niveles de ruido y para una Relación Señal a Ruido (SNR^{16} , por sus siglas en inglés) baja tendría problemas.

Así mismo en [22] se menciona un umbral para la SNR bajo el que este tipo de detector no captaría la presencia de un usuario primario.

$$SNR_{wall} = 10 \log \left(10^{\frac{x}{10^{-1}}} \right) \quad (1)$$

También se describe que básicamente este tipo de detector capta la presencia o ausencia de señal, pero no diferencia si es una señal modulada, ruido o interferencia.

¹⁶ SNR: Proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que interfiere.

De la misma manera no se verifica si la señal detectada es modulada, si es de un usuario primario o de otro dispositivo de radio cognitiva.

Una característica totalmente en contra de este detector es que no va a funcionar para señales CDMA¹⁷, debido a la naturaleza de estas. En el caso del presente diseño tenemos señales de Frecuencia Modulada (FM, por sus siglas en inglés).

Ahora según [21], [22], la señal a recibir es de la forma:

$$y(n) = x(n) + r(n) \quad (2)$$

Donde:

$x(n)$: señal a detectar.

$r(n)$: ruido blanco gaussiano.

n : índice de la muestra

Se considera las muestras de ruido independientes y también las señales recibidas a partir de las cuales se calcula la métrica M que se compara con el umbral λ .

$$M = \sum_1^N |y(n)|^2 \quad (3)$$

Donde:

N : tamaño del vector de muestras.

Tomando en cuenta lo anterior, se manejan dos hipótesis:

$$H_0: y(n) = r(n) \quad (4)$$

$$H_1: y(n) = x(n) + r(n) \quad (5)$$

Y dos probabilidades:

$$P_D = P(M > \lambda | H_1) \quad (6)$$

¹⁷ CDMA (Code Division Multiple Acces, Acceso Múltiple por división de Código): Técnica de acceso múltiple basada en espectro ensanchado, en la que se usan códigos ortogonales para cada señal transmitida.

$$P_F = P(M > \lambda | H_0) \quad (7)$$

Donde:

P_D : Probabilidad de decisión acertada.

P_F : Probabilidad de falsa alarma.

De este modo los diferentes autores concuerdan que el verdadero reto es elegir un umbral óptimo que cumplan un balance adecuado entre las dos probabilidades anteriores.

4.5.2.2. Detector por Filtro Adaptado

[22] describe esencialmente al detector por filtro adaptado como: “Básicamente un filtro adaptado adecua su respuesta al impulso de manera tal que al tomar las muestras de la señal en un tiempo específico, la salida del filtro sea equivalente a la salida de un receptor de correlación.”

En realidad se lo reconoce como el método óptimo [4], [22],[23], ya que requiere de un tiempo muy corto para detectar la presencia o ausencia de una transmisión por parte de un usuario primario.

En realidad lo anterior es acertado pero tomando en cuenta que este tipo de detector debe conocer con anticipación las características de la señal recibida. Estas características son: “frecuencia central, tipo de modulación, ancho de banda, forma del pulso y formato de trama.” [22]

Entonces se reconoce que a pesar de ser el método óptimo para la detección cuando se conocen estas características de la señal de usuario primario, esto mismo constituye una desventaja por el hecho de que llevar a la práctica un detector con tales características es muy complejo.

4.5.2.3. Detector basado en la Cicloestacionariedad.

Anteriormente con el detector de energía, continuamente se verifica el espectro midiendo el nivel de energía de las señales presentes y comparándolas con el umbral preestablecido, esto trae inconvenientes ya que el ruido también posee energía, así no se

podrían detectar las señales CDMA. A diferencia de lo anterior el presente detector aprovecha las características de periodicidad que poseen las señales moduladas.

Entonces una señal que transporta información tiene diferencias al ruido y la interferencia, ya que nuestra señal recibida debe presentar cambios en tiempos iguales, debido a que las señales moduladas se forman a partir de funciones periódicas, tal como se menciona en [22].

Sabemos que las señales moduladas siempre tienen características periódicas, así mismo en ciertas normas se usan tonos pilotos. Conociendo estas características se las puede aprovechar a beneficio de los usuarios secundarios.

Entonces mediante un algoritmo de este tipo se puede diferenciar la señal de un usuario primario, ruido o la de un usuario secundario. Debido a que el ruido es estacionario y sin correlación, mientras que las señales moduladas son cicloestacionarias [5].

Básicamente y hablando en términos sencillos lo que hace este método es extraer las características periódicas intrínsecas de las señales moduladas y aplicar un análisis de Fourier.

Su gran y más significativa ventaja es su robustez frente al ruido incluso con SNR bajas así como a las interferencias.

Otra gran ventaja es que pueden diferenciar las señales, es decir que pueden clasificarlas dependiendo de sus periodicidades ya que diferentes modulaciones presentan diferentes periodicidades y por lo tanto sus características espectrales están en diferentes frecuencias [22].

Por otro lado al realizar todos los cálculos y basarse en las periodicidades de las señales lo hacen un detector robusto, pero así mismo esto conlleva un alto costo computacional y sobre todo el tiempo para la detección será mayor en comparación con un detector de energía y el de filtro adaptado. Así mismo su diseño es mucho más complejo que un detector de energía.

4.5.3. Comparación: Ventajas y desventajas de cada tipo de Detector

A continuación se muestra un cuadro comparativo en el que se menciona las características fundamentales de cada tipo de detector. Este cuadro es tomado de [24].

Método	Parámetro de Decisión	Ventajas	Desventajas
Detector de Energía	Comparación de la energía de la señal recibida con un umbral	Sencilla de implementar, no requiere información a priori a cerca de la señal primaria.	No funciona en entornos con baja SNR, tiene alta tasa de falsa alarma.
Detector de características Cicloestacionarias	La comparación de los valores diferentes de cero obtenidos por la CSD ¹⁸ de las propiedades cicloestacionarias de la señal primaria	Robusto frente a ruido, puede diferenciar entre distintos tipos de transmisiones primarias.	Fallará si la señal primaria no tiene propiedades cicloestacionarias, alta complejidad computacional, costo alto, se requiere de un conocimiento previo de la señal primaria.
Detector de filtro adaptado	Correlacionar la señal recibida con la señal primaria conocida	Requiere un menor tiempo de detección, óptimo si la señal primaria es conocida.	Presenta una alta complejidad, requiere receptores por separado para cada usuario primario, requiere un conocimiento previo de la señal primaria.

Tabla 1 Resumen de las técnicas para detección de espectro [24].

¹⁸ CSD (Cyclic Spectrum Density, Densidad Espectral Cíclica): Función que describe la densidad espectral en una serie temporal, la cual solo se aplica a procesos cicloestacionarios.

5. Materiales y métodos

5.1. Materiales

El presente trabajo representa un diseño realizado utilizando la herramienta de software MATLAB, por lo cual no se ha manejado recursos físicos; sin embargo se pueden citar como materiales los siguientes:

- Computador Portátil.
- Software MATLAB.
- Recursos Bibliográficos (Estudios previos).

Estos tres recursos han servido para efectuar el diseño antes mencionado, tomando en cuenta que no se han requerido mediciones o estudios previos por parte del autor, debido principalmente a la existencia de estudios como [2], que muestran las pautas sobre las que se basa este trabajo.

5.2. Métodos

En cuanto a los métodos, en el trabajo previo a la realización del presente diseño se ha hecho énfasis en cuatro instancias:

- Método de observación
- Método inductivo
- Método Deductivo
- Técnica de prueba y error (Método Científico)

El método de observación, hace referencia al trabajo de campo para mediciones que podrían ser necesarias en la obtención de datos requeridos en el diseño. Esto no ha sido necesario, debido a la existencia de trabajos orientados al estudio del espectro tanto en la parte de CR como en FM.

En vista de lo anterior con la búsqueda de información bibliográfica referente a estudios previos que ayuden a encaminar el presente trabajo, se evita tener que realizar mediciones propias, ya que por ejemplo en [2] se tiene información que corresponde entre otras a la ciudad de Loja, lo cual es de nuestro interés.

Una vez con la información necesaria, se tiene lo requerido para iniciar con el diseño propuesto. Básicamente en este punto se emplearía el método deductivo para utilizar de la mejor manera la información recopilada, así como el método científico con la técnica de prueba y error.

A continuación se describe el diseño planteado empleando la información recopilada previamente.

5.2.1. Diseño

El proceso de diseño del detector de energía se basa siguiendo el diagrama de bloques mostrado en la figura número 9, así mismo, la información recopilada de [2], [25], [26] y [27] aporta los criterios y valores útiles para la simulación del ambiente de detección de energía.

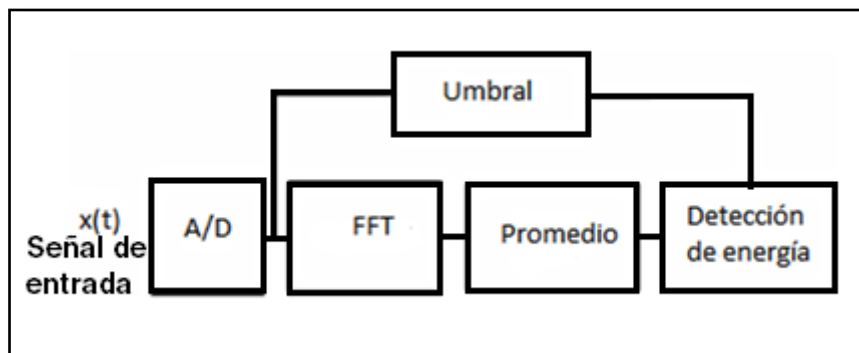


Figura 9. Implementación de un detector de energía [25].

El diseño presentado se ha realizado en MATLAB, en un ambiente de simulación. Tomando en cuenta esto, se debe modelar además del detector, la señal a analizar, conjuntamente con las pérdidas e interferencias que nos permitan poner a prueba el diseño del detector en sí.

Con lo mencionado en el párrafo anterior y según muestra la figura 9, se ha establecido un diagrama de bloques que engloba todo el diseño a realizar desde el modelado de un banco de señales FM hasta la salida del detector de energía, previa a la comparación con el umbral seleccionado.

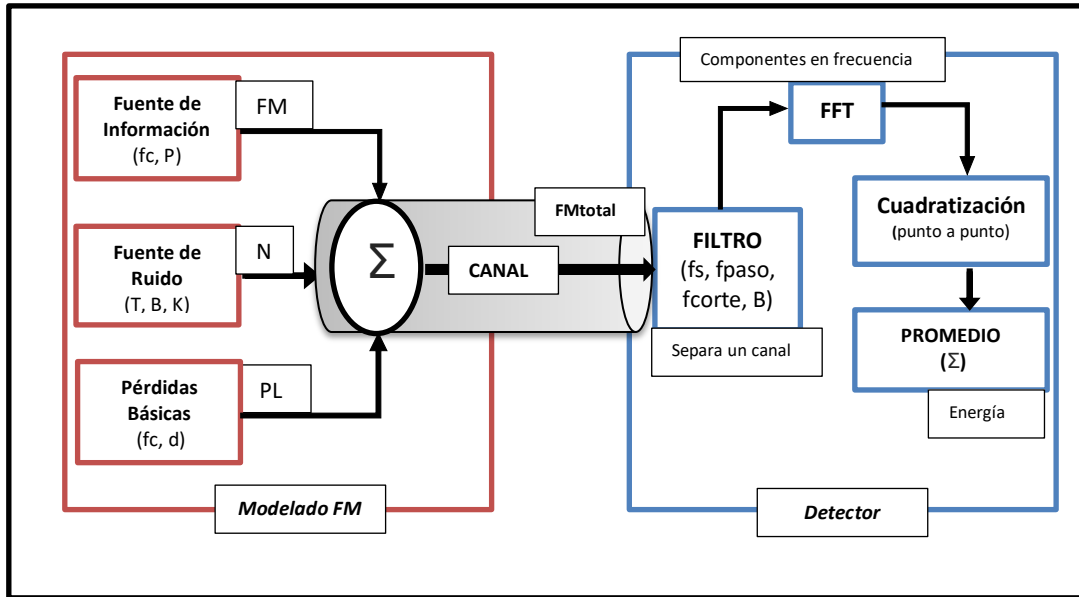


Figura 10. Diagrama de bloques que muestra cada paso a seguir previo a la comparación con el umbral.

Desde ahora, el diseño será mostrado en bloques, tomando en cuenta la Figura 10 y así poder comprender mejor el desarrollo.

5.2.1.1. Banco de Señales de Entrada

Tomado en cuenta que el presente trabajo está orientado a la banda designada a radiodifusión FM (88 – 108 MHz), el banco de señales se ha modelado en base a expresiones matemáticas de modulación en frecuencia.

Al tratarse de un detector de energía, es posible prescindir en este diseño de los parámetros técnicos con los que cada una de las emisoras de radio transmiten sus señales, bastando con obtener una potencia de similares características a las que ellos generan en sus operaciones; sin embargo para el presente banco de señales se han tomado algunos parámetros de modulación FM mencionados en [26]. La expresión utilizada para modulación en frecuencia según [26] es la siguiente:

$$\varphi_{FM}(t) = A_c \cos[\omega_c t + K_f \int f(t) dt] \quad (8)$$

Según la TABLA 6-2 (Resumen de modulación angular), página 237 en [26], la expresión final puede tomar la siguiente forma:

$$\varphi_{FM}(t) = A_c \cos[\omega_c t + m \sin(\omega_m t)] \quad (9)$$

con entrada : $f(t) = A_m \cos(\omega_m t)$

Para el presente diseño se ha utilizado la ecuación 9, donde:

A_c : Amplitud máxima de portadora FM.

ω_c : $2\pi f_c$ frecuencia portadora.

m : índice de modulación.

ω_m : $2\pi f_m$ frecuencia moduladora.

Según menciona [26], algunas consideraciones sobre los parámetros que intervienen son:

- La frecuencia máxima de la señal moduladora es de 15KHz.
- El índice de modulación en el peor de los casos es igual a 5.

Ahora, con estos parámetros se necesita lograr una señal con determinada potencia que permita poner a prueba el diseño del detector. Para esto según [27], en su artículo 31, señala: “La potencia mínima de las estaciones de frecuencia modulada será, en general, de 250 vatios, con excepción de las que se ubiquen en ciudades cuya población exceda de doscientos mil habitantes, en las que será de quinientos vatios”.

El cantón Loja según el censo del INEC del 2010, abarca un total de 214,855 habitantes. Si se toma en cuenta que el casco urbano (52Km^2) de la ciudad no abarca la totalidad de dichos habitantes, se puede seleccionar el valor de 250W como parámetro de trabajo en el presente diseño.

Además según las normas técnicas descritas en los títulos habilitantes otorgados por la *ARCOTEL* a las estaciones repetidoras y matrices para la ciudad de Loja, la potencia máxima de operación para radiodifusión FM es de 1KW, tal como se puede observar en el Anexo 1.

Por lo tanto es factible utilizar el valor mínimo de 250W como base para el presente diseño, ya que la potencia con que operan las emisoras de radio podrían ser superiores y con ello se obtendrían aún mejores resultados.

Loja presenta un relieve muy irregular, presentando altitudes desde los 700m hasta más de 1700m según informes del Instituto Geográfico Militar. Así mismo presenta una numerosa red hidrográfica constituida por varios ríos.

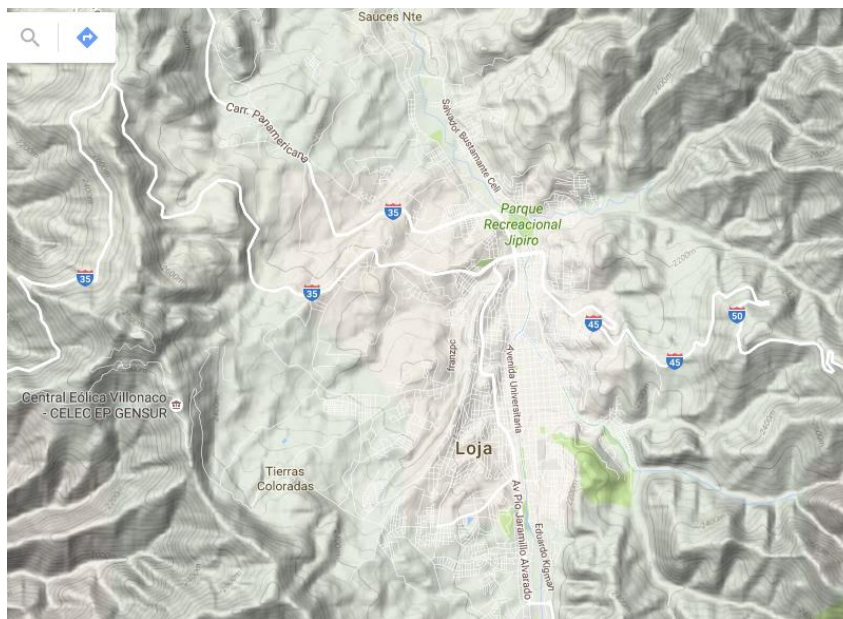


Figura 11. Relieve de la ciudad de Loja.

El casco urbano (52 Km² según el “*Plan de Regeneración Urbana del Casco Céntrico la Ciudad de Loja*”) de la ciudad de Loja está sobre una hoya, siendo su relieve como una especie de “papel arrugado”, en sí los principales ríos que forman el delta sobre el que se asienta el centro de la ciudad son: el río Zamora y el río Malacatos.

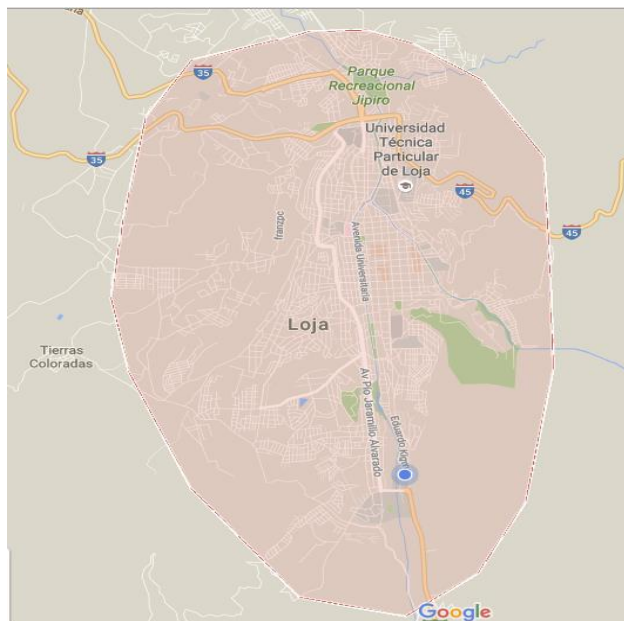


Figura 12. Vista de mapa de la ciudad de Loja.

Tomando en cuenta las colinas, los ríos, además de los edificios, estos son factores que afectan en mayor o menor medida las transmisiones vía radio. Las emisoras de la ciudad así como las repetidoras de otras estaciones de radio de otros lugares deberían transmitir con potencias similares o superiores a los 250W, sin pasarse del límite de 1KW por no causar interferencias. Esta potencia cual fuera que sea, se verá deteriorada por los factores antes mencionados. En el presente diseño se ha tomado el valor de 250W, considerando lo anterior. Si las transmisiones son de mayor potencia los resultados serán aún mejores que los obtenidos en el presente trabajo, por lo tanto aquí se estaría trabando en cierta forma en uno de los peores escenarios en cuanto a potencia transmitida.

Con todas estas consideraciones se ha diseñado un banco de señales FM que representa la radiodifusión en esta banda. Cada uno de los canales representa una emisora de radio que puede o no estar activa, lo importante es que cada uno de estos canales ha sido adaptado para generar una potencia similar a los 250W.

```

% #####
%                                     UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
%                                     A.E.I.R.N.N.R.
%                                     C.I.E.Y.T.
% Autor : Francisco Narváez
% Tema  : DETECTOR DE ENERGÍA PARA SEÑALES DE RADIO FM EN RADIO COGNITIVA
% Asunto: Trabajo previo a la obtención del título de Ingeniero en
%          Electrónica y Telecomunicaciones

```

```

%% #####
%   |_MATRIZ DE ENTRADA QUE REPRESENTA LAS 31 EMISORAS DE RADIO PRESENTES EN
%                                     LA CIUDAD DE LOJA_|
% #####
clear
clc
ENT=[1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 0
1 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0
0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0];

%% #####
%   |_BANCO SEÑALES DE ENTRADA REPRESENTANDO LA ENERÍA EMITIDA POR LA
%                                     EMISORAS DE RADIO_|
% #####
% Cada expresión representa una señal FM estéreo en la frecuencia portadora
% correspondiente
% El propósito de estas señales es tener la presencia de energía necesaria
% para proceder a su análisis, no es de vital importancia saber los
% parámetros con exactitud por tratarse de un detector de energía.

    fs=2*109*10^(6);      %Frecuencia de muestreo
    Ts=1/fs;             %Período de muestreo
    t=0:Ts:4*10^(-4);    %Tiempo de señal
    AC=1;                %Amplitud de Portadora
    Ac=AC*1120;          %Variable para estimar la potencia
    m=5;                 %índice de modulación
    wm=2*pi*15000;       %frecuencia moduladora en radianes

%% FRECUENCIAS PORTADORAS (cada portadora se encuentra almacenada en el
vector "FC")

    fc=87.9*10^6;        %Variable de inicio;

    for x=1:100          %Se necesita 100 portadoras correspondientes a los
                        %100 canales
        fc=fc+200*10^3; %Se aumenta la variable en 200KHz que es la
                        %separación entre portadoras para FM
        FC(x)=fc;        %Se almacena el resultado en el vector "FC"
    End
%% PRIMERA SEÑAL

    wc1=2*pi*FC(1);     % Frecuencia portadora en
                        %radianes

    if ENT(1)==0;        % Si la entrada me indica "0"
        fiFM1=zeros(1,length(t)); % No existe señal
    else                 % Caso contrario
        fiFM1=Ac.*cos(wc1.*t + m.*sin(wm.*t)); % Expresión para Modulación en
                                                %frecuencia
    end

%% SEÑAL 2

    wc2=2*pi*FC(2);
    if ENT(2)==0;
        fiFM2=zeros(1,length(t));
    else
        fiFM2=Ac.*cos(wc2.*t + m.*sin(wm.*t));
    end
end

```

```

%% SEÑAL 3

wc3=2*pi*FC(3);
if ENT(3)==0;
    fiFM3=zeros(1,length(t));
else
    fiFM3=Ac.*cos(wc3.*t + m.*sin(wm.*t));
end

%% SEÑAL 4

wc4=2*pi*FC(4);
if ENT(4)==0;
    fiFM4=zeros(1,length(t));
else
    fiFM4=Ac.*cos(wc4.*t + m.*sin(wm.*t));
end

%% SEÑAL 5

wc5=2*pi*FC(5);
if ENT(5)==0;
    fiFM5=zeros(1,length(t));
else
    fiFM5=Ac.*cos(wc5.*t + m.*sin(wm.*t));
end

.
.
.
%% SEÑAL 100

```

Hasta aquí se muestra como se generan 5 señales. Las restantes 95 siguen la misma rutina, que ha sido el número de entradas con las que se ha hecho prueba y error la mayoría de veces. A lo largo del diseño se trabaja con 100 señales concatenadas como una sola señal. Si bien es cierto hasta la fecha de realización del presente trabajo se han considerado 31 emisoras de radio presentes en la ciudad, puede y de hecho se dará el caso de que aumente el número de las mismas, entonces solo bastaría con editar el respectivo canal el matriz de ENTRADA. La ocupación espectral que se maneja en este diseño se puede observar en el Anexo 2. Las gráficas obtenidas de esta generación se pueden visualizar en los anexos 3, 4 y 5.

Lo más importante a tener en cuenta en este apartado es que en realidad no es de vital importancia cumplir con los parámetros técnicos de FM, debido a que se trabaja en un **Detector de Energía** el cual únicamente se enfoca en la distribución de la energía.

Posterior a la generación de cada señal individual, se las suma para obtener todo el espectro FM.

```
%% CONCATENACIÓN DE CADA SEÑAL PARA FORMAR UNA SEÑAL ÚNICA

FMT=fiFM1+fiFM2+fiFM3+fiFM4+fiFM5+fiFM6+fiFM7+fiFM8+fiFM9+fiFM10+fiFM11+fiFM12
+fiFM13+fiFM14+fiFM15+fiFM16+fiFM17+fiFM18+fiFM19+fiFM20+fiFM21+fiFM22+fiFM23+
fiFM24+fiFM25+fiFM26+fiFM27+fiFM28+fiFM29+fiFM30+fiFM31+fiFM32+fiFM33+fiFM34+f
iFM35+fiFM36+fiFM37+fiFM38+fiFM39+fiFM40+fiFM41+fiFM42+fiFM43+fiFM44+fiFM45+fi
FM46+fiFM47+fiFM48+fiFM49+fiFM50+fiFM51+fiFM52+fiFM53+fiFM54+fiFM55+fiFM56+fiF
M57+fiFM58+fiFM59+fiFM60+fiFM61+fiFM62+fiFM63+fiFM64+fiFM65+fiFM66+fiFM67+fiFM
68+fiFM69+fiFM70+fiFM71+fiFM72+fiFM73+fiFM74+fiFM75+fiFM76+fiFM77+fiFM78+fiFM7
9+fiFM80+fiFM81+fiFM82+fiFM83+fiFM84+fiFM85+fiFM86+fiFM87+fiFM88+fiFM89+fiFM90
+fiFM91+fiFM92+fiFM93+fiFM94+fiFM95+fiFM96+fiFM97+fiFM98+fiFM99+fiFM100;
```

5.2.1.2. Ruido y Pérdidas

Para el presente diseño se consideran los parámetros básicos de ruido y pérdidas en transmisiones por radio, estos son las pérdidas en el espacio libre, que dependen tanto de la frecuencia como de la distancia, y el ruido presente en cualquier sistema, como ruido térmico, que se combina con valores aleatorios y así obtener la naturaleza aleatoria del mismo.

RUIDO TÉRMICO

De [28] se tiene:

$$N = KTB \quad (10)$$

N: Potencia de ruido (Watts)

B: Ancho de banda (Hertz)

K: Constante de proporcionalidad de Boltzmann (1.38 X 10⁻²³ J/ °K)

T: Temperatura absoluta en grados Kelvin (ambiente, 290°K)

```
%% #####
%   |_REPRESENTACIÓN DEL RUIDO PRESENTE EN EL RECEPTOR Y PÉRDIDAS BÁSICAS_|
%   #####

% RUIDO PRESENTE EN EL RECEPTOR

K = 1.3806504*10^(-23);           % constante de Boltzmann(J/°K).
T = 298.15;                       % Temperatura(°K). (25°C)
B = 20*10^6;                       % Ancho de banda (20MHz).
No = K*T*B;                         % Ruido térmico.
```

```
No_dBm = 10*log10(No/0.001);           % Ruido en dBm
ruido = sqrt(0.001*10^(No_dBm/10));    %Parámetro de ruido

RUIDO = (ruido)*(randn(1,length(FMT))); %Ruido Ambiente, es una variable
                                         aleatoria
```

Para la generación del ruido se ha tomado en cuenta todo el ancho de banda de FM (20MHz) y una temperatura promedio de 25°C.

PÉRDIDAS BÁSICAS

De [29] se obtiene la siguiente expresión de pérdidas en el espacio libre:

$$PL (dB) = 32.45 + 20 \log_{10}(f (MHz)) + 20 \log_{10}(d(km)) \quad (11)$$

f: frecuencia central de la señal de entrada.

d: distancia entre TX y RX.

```
%% PÉRDIDAS BÁSICAS

FC=FC./1000000;           % Frecuencias portadoras en MHz
dist=5;                   % Distancia inicial para la evaluación

for r=1:4                 % Variable para evaluar en cuatro valores
                           de distancia: 5, 10, 15 y 20 Km
%%
    perdida1 = 32.4 + 20*log10(FC(1)) + 20*log10(dist); % Pérdida para la
                                                         primera
                                                         portadora.
                                                         Expresada en "dB"

    PL = 10^(-perdida1/10); % Pérdida en valor
                             decimal

    for c = 1:length(fiFM1)
        FMsignal1(c) = PL*fiFM1(c); % Se añade la perdida a cada punto de
                                     la señal en dicha frecuencia
    end

%%
    perdida2 = 32.4 + 20*log10(FC(2)) + 20*log10(dist);
    PL2 = 10^(-perdida2/10);

    for c = 1:length(fiFM2)
        FMsignal2(c) = PL2*fiFM2(c);
    end

%%
    perdida3 = 32.4 + 20*log10(FC(3)) + 20*log10(dist);
    PL3 = 10^(-perdida3/10);

    for c = 1:length(fiFM3)
        FMsignal3(c) = PL*fiFM3(c);
    end

%%
```

```

perdida4 = 32.45 + 20*log10(FC(4)) + 20*log10(dist);
PL4 = 10^(-perdida4/10);

for c = 1:length(fiFM4)
    FMsignal4(c) = PL*fiFM4(c);
end
%%
perdida5 = 32.4 + 20*log10(FC(5)) + 20*log10(dist);
PL5 = 10^(-perdida5/10);

for c = 1:length(fiFM5)
    FMsignal5(c) = PL*fiFM5(c);
end
.
.
.
end

```

En este apartado se muestra la generación de pérdidas para cinco de los 100 canales de FM. La variable “r” que se puede observar al inicio, en el lazo “For” se utiliza para anidar desde ese punto hasta el final del programa diseñado para evaluar en 5, 10, 15 y 20 Km.

Se ha evaluado en estos valores, tomando en cuenta las distancias más lejanas obtenidas mediante Google Earth.

Tomando como referencia el cerro Ventanas, Sauces Norte y el sector de los dos Puentes como sitios más lejanos, obtenemos las siguientes distancias:

- VENTANAS – SAUCES NORTE: Aproximadamente 10Km.
- VENTANAS – DOS PUENTES: Aproximadamente 7Km.
- VENTANAS – PARQUE CENTRAL: Aproximadamente 6Km.

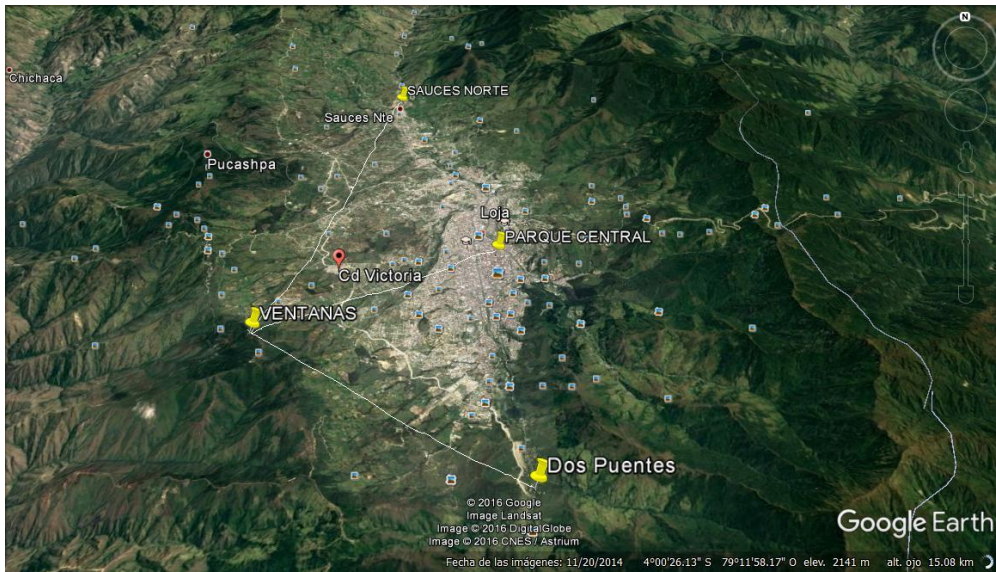


Figura 13. Distancias máximas a tener en cuenta para la evaluación dentro del casco urbano de la ciudad de Loja.

Con los valores de distancias evaluados, se cubre perfectamente el casco urbano de la ciudad e incluso se llega más allá del mismo.

En resultados que se obtienen y que serán analizados más adelante se puede observar que se logra una detección hasta poco más de 15 Km.

Posterior a esto, todas las señales afectadas por las pérdidas se suman para formar una expresión única.

%%

% CONCATENACIÓN DE TODAS LAS SEÑALES INCLUIDAS LAS PÉRDIDAS

FM_R=FMsignal1+FMsignal2+FMsignal3+FMsignal4+FMsignal5+FMsignal6+FMsignal7+FMsignal8+FMsignal9+FMsignal10+FMsignal11+FMsignal12+FMsignal13+FMsignal14+FMsignal15+FMsignal16+FMsignal17+FMsignal18+FMsignal19+FMsignal20;

FM_R=FM_R+FMsignal21+FMsignal22+FMsignal23+FMsignal24+FMsignal25+FMsignal26+FMsignal27+FMsignal28+FMsignal29+FMsignal30+FMsignal31+FMsignal32+FMsignal33+FMsignal34+FMsignal35+FMsignal36+FMsignal37+FMsignal38+FMsignal39+FMsignal40;

FM_R=FM_R+FMsignal41+FMsignal42+FMsignal43+FMsignal44+FMsignal45+FMsignal46+FMsignal47+FMsignal48+FMsignal49+FMsignal50+FMsignal51+FMsignal52+FMsignal53+FMsignal54+FMsignal55+FMsignal56+FMsignal57+FMsignal58+FMsignal59+FMsignal60;

FM_R=FM_R+FMsignal61+FMsignal62+FMsignal63+FMsignal64+FMsignal65+FMsignal66+FMsignal67+FMsignal68+FMsignal69+FMsignal70+FMsignal71+FMsignal72+FMsignal73+FMsignal74+FMsignal75+FMsignal76+FMsignal77+FMsignal78+FMsignal79+FMsignal80;

FM_R=FM_R+FMsignal81+FMsignal82+FMsignal83+FMsignal84+FMsignal85+FMsignal86+FMsignal87+FMsignal88+FMsignal89+FMsignal90+FMsignal91+FMsignal92+FMsignal93+FMsignal94+FMsignal95+FMsignal96+FMsignal97+FMsignal98+FMsignal99+FMsignal100;

Luego se añade la señal de ruido antes calculada

```
%% EXPRESIÓN FINAL QUE REPRESENTA EL BANCO DE SEÑALES AÑADIDO RUIDO Y LAS
PÉRDIDAS
```

```
FM_RF=FM_R+RUIDO;
```

5.2.1.3. Filtrado

La parte de filtrado es quizá una de las más complicadas dentro del diseño, pues la idea planteada radica en tener un filtro con el ancho de banda de un canal FM (200KHz) que pueda deslizarse, haciendo un barrido por toda la banda FM. La idea de pensar en una implementación física mediante componentes analógicos resultaría un tanto complicada por el hecho de hacer que el filtro se “mueva” en frecuencia.

El método para diseñar el filtro con el que se ha obtenido los mejores resultados es mediante la herramienta de MATLAB conocida como FDATool (Filter Design & Analysis Tool), cuya interfaz se puede visualizar en el Anexo 6.

Las atenuaciones tanto para la banda de paso como la de rechazo se han dejado en los valores por defecto de dicha herramienta, especificando únicamente que se trata de un filtro pasabanda, basado en Butterworth, las frecuencias de corte y la frecuencia de muestreo.

Para poder “mover” en frecuencia el filtro en cada iteración de un lazo FOR, ha sido necesario ingresar al código fuente del diseño arrojado por la herramienta FDATool y extraer el mismo, para posteriormente anexarlo al presente diseño sobre **DETECTOR DE ENERGÍA**. Con lo antes mencionado, las variables utilizadas en dicho código fuente se han conservado con sus mismos nombres en el presente diseño; solo se las adapta de acuerdo a las necesidades que se presenten.

```
%% #####
%      |_FILTRADO, FFT Y CUADRATIZACIÓN PARA LA COMPARACIÓN_|
%      #####

% El código del filtro ha sido extraído del código fuente de la herramienta
% FDATool de matlab, mediante el cual se realizó el diseño del filtro. Por tal
% motivo los nombres de las variables se han mantenido como se encuentran en
% dicho código fuente.

Fs = 2*109*10^6;          % Frecuencia de muestreo del filtro (debe ser la
                        % misma con que se muestreó la señal de entrada)

%Fstop1 = 95.59*10^6;    % First Stopband Frequency
```

```

%Fpass1 = 95.6*10^6;      % First Passband Frequency
%Fpass2 = 95.8*10^6;      % Second Passband Frequency
%Fstop2 = 95.81*10^6;     % Second Stopband Frequency
Astop1 = 80;              % First Stopband Attenuation (dB)
Apass = 1;                % Passband Ripple (dB)
Astop2 = 80;              % Second Stopband Attenuation (dB)
match = 'stopband';      % Band to match exactly

% Construct an FDESIGN object and call its BUTTER method.
%h = fdesign.bandpass(Fstop1, Fpass1, Fpass2, Fstop2, Astop1, Apass, ...
%                   Astop2, Fs);
%Hd = design(h, 'butter', 'MatchExactly', match);

%% VARIABLES PARA EL DISEÑO DEL FILTRO

Fstop1 = 87.99*10^6;      % First Stopband Frequency
Fpass1 = 88*10^6;         % First Passband Frequency
Fpass2 = 88.2*10^6;      % Second Passband Frequency
Fstop2 = 88.21*10^6;     % Second Stopband Frequency

j=200*10^3;              % Variable para aumentar los parámetros de
                        % diseño (200KHz)

for i=1:100              % Se realiza en 10 iteraciones
                        % correspondientes a los 100 canales FM

    h = fdesign.bandpass(Fstop1, Fpass1, Fpass2, Fstop2, Astop1, Apass, ...
        Astop2, Fs);
    Hd = design(h, 'butter', 'MatchExactly', match);

%% APLICACIÓN DEL FILTRO A LA SEÑAL EN LA ENTRADA DEL DETECTOR

filtro=Hd;              % Se guarda el filtro diseñado en la
                        % variable "filtro"

L=length(FM_RF);        % Longitud de la señal a la entrada
                        % del detector

NFFT=2^nextpow2(L);     % Siguiete potencia de dos, utilizada
                        % para el cálculo de la FFT (De
                        % acuerdo al código de la Mathworks)

FF=fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); % Escala horizontal para la gráfica de
                        % una FFT

canal=filter(filtro,FM_RF); % APLICACIÓN DEL FILTRO A LA SEÑAL

```

5.2.1.4. FFT

```

CANAL=fft(canal,NFFT); % Obtención de la FFT de la porción de
                        % señal recortada por el filtro

```

(En este punto se debe aclarar que los parámetros como L, NFFT, FF, propios para calcular la FFT de la señal filtrada se han anexo desde la Mathworks).

5.2.1.5. Obtención de la potencia

```
%% CUADRATIZACIÓN (OBTENCIÓN DL VALOR DE POTENCIA FILTRADO)

P=0; % Variable para almacenar
      la potencia calculada,
      en decimal

for g = 1:length(CANAL) %
    P = P+ (abs(CANAL(g))^2); % Cada punto de la porción
                              de señal se cuadratiza y
                              se suma
end

P = (1/length(CANAL))*P; % El valor obtenido se
                          normaliza

POTdBm(r,i)= roundn(10*log10(P/0.001),-2); % Se obtiene el valor el
                                             dBm para poder comparar

pot=POTdBm(r,i); % Se almacena cada valor
                  obtenido en una matriz
```

5.2.1.6. Comparación

```
%% COMPARACIÓN MEDIANTE EL VALOR UMBRAL

% El umbral establecido se lo ha escogido según la sensibilidad para
receptores FM, que para el presente caso de estudio (Casco Urbano de la
Ciudad de Loja) correspondería a valores en potencia aproximadamente
mayores a -55dBm.

if pot>=-55 % Si el valor obtenido
            sobrepasa el valor umbral

    TABLA_DETECION(r,i)=1; % Se marca como señal presente

    else % Caso contrario

    TABLA_DETECION(r,i)=0; % Se marca como señal ausente
end

%% SE INCREMENTAN LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DEL FILTRO
Fstop1 = Fstop1+j;
Fpass1 = Fpass1+j;
Fpass2 = Fpass2+j;
Fstop2 = Fstop2+j;

end
dist=dist+5; % Se incrementa la
              distancia desde el TX

end % Final del FOR para
    las distancias
```

El umbral de trabajo se ha escogido dependiendo de la sensibilidad requerida por los receptores de FM, especificada en [30] y que se muestra en el Anexo 7.

Para obtener los valores en dBm se ha utilizado la siguiente relación:

$$dBm = dBuV - 107 \quad (12)$$

6. Resultados

A continuación se muestran cada uno de los resultados que se han obtenido una culminado el presente trabajo.

Anteriormente ya se mencionó el banco de señales obtenido mediante el diseño inicial de 5 canales. Ahora se muestra el resultado con las 100 señales.

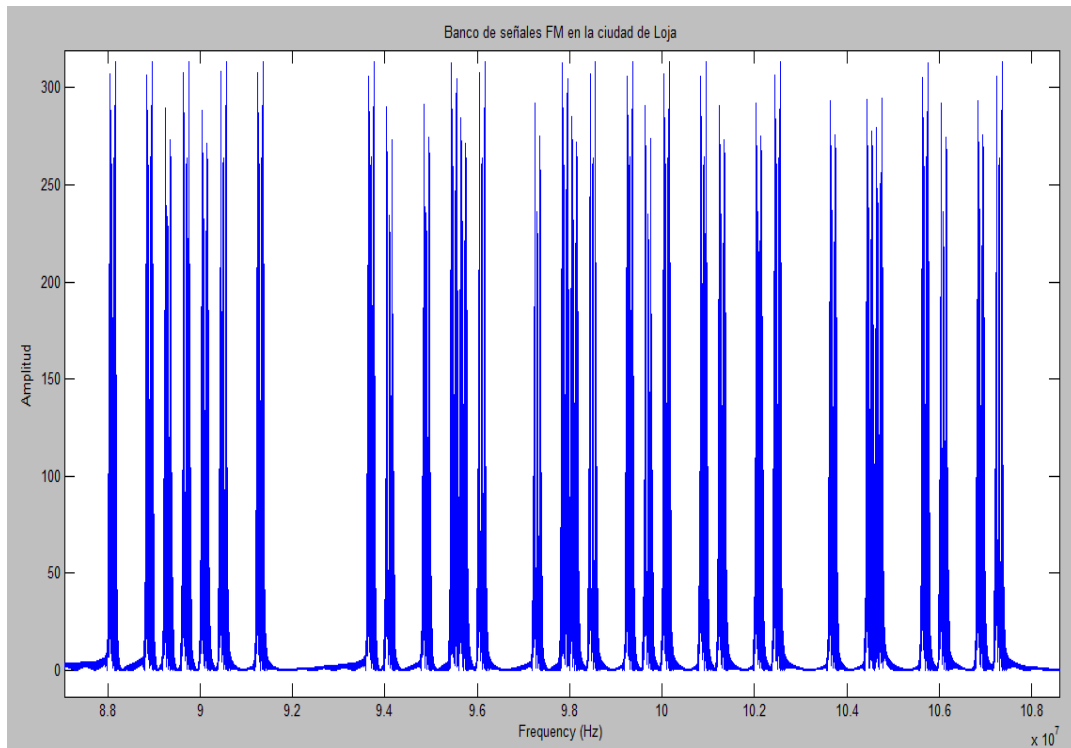


Figura 14. Banco de 100 señales en FM (31 activas, según la información de la ciudad de Loja).

Cada una de las señales está almacenada en una matriz que se puede verificar en el código (.m) que se anexa con el presente trabajo y que se puede observar en la figura 14. Una vez que se han añadido ruido y pérdidas se obtiene lo siguiente:

➤ Para 5Km

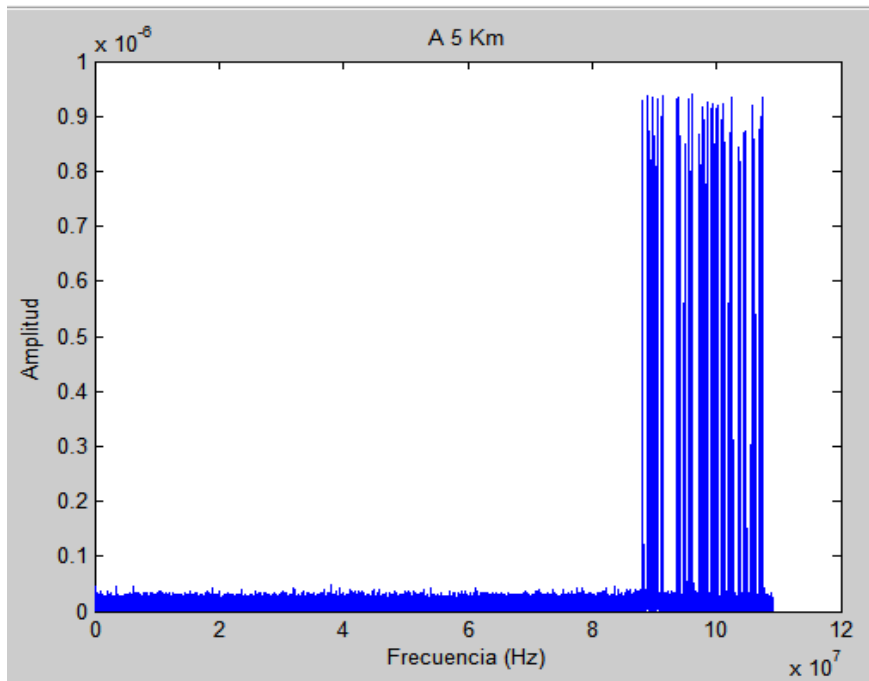


Figura 15. Espectro de las 100 señales atenuadas por las interferencias a una distancia de 5Km.

➤ Para 10Km

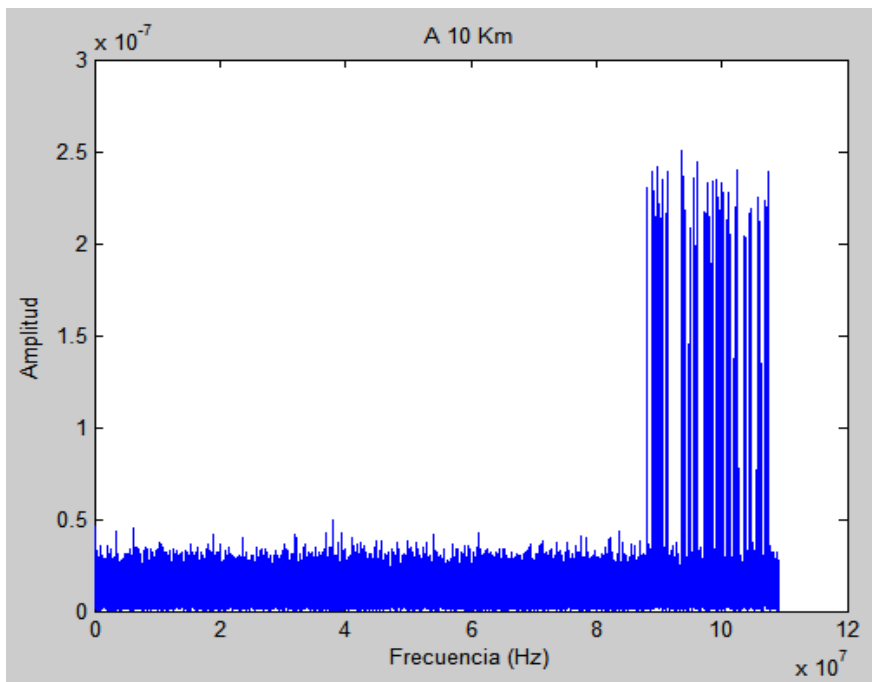


Figura 16. Espectro de las 100 señales atenuadas por las interferencias a 10Km.

➤ Para 15Km

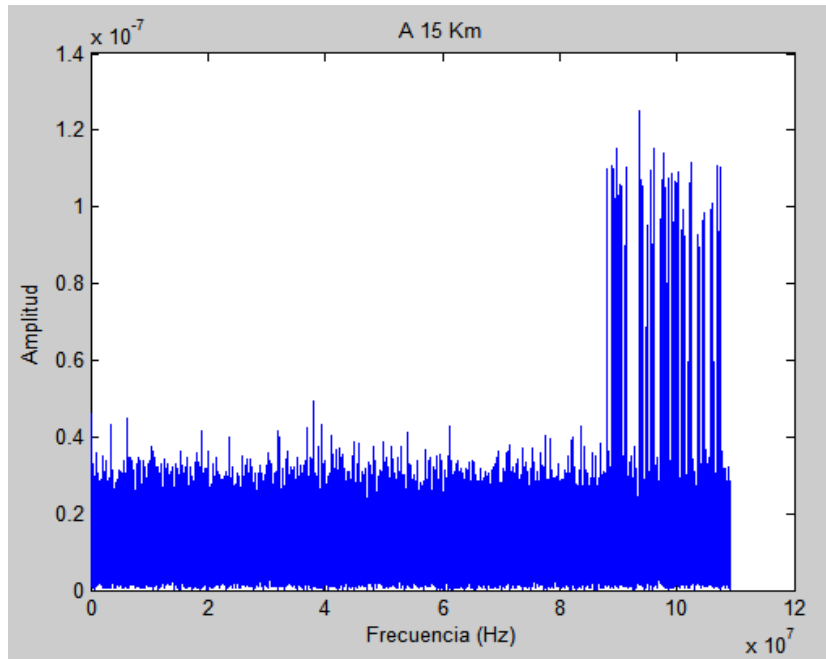


Figura 17. Espectro de las 100 señales atenuadas por las interferencias a 15Km.

➤ Para 20Km

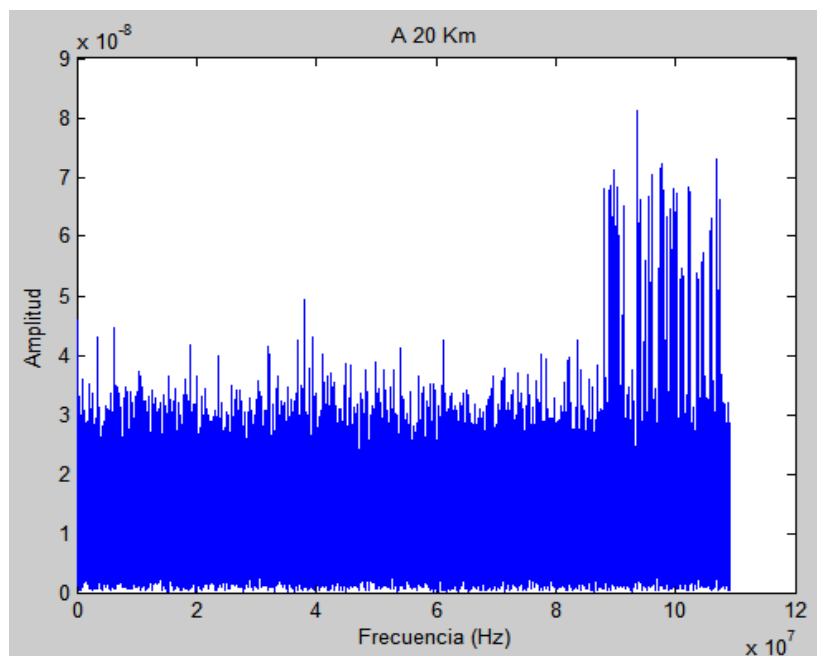


Figura 18. Espectro de las 100 señales atenuadas por las interferencias a 20Km.

Como se puede observar mientras más se aleja del Transmisor la señal se atenúa hasta que ya se no se puede considerar como una señal válida según la intensidad requerida. Esto se puede verificar con mayor facilidad en la Figura 19.

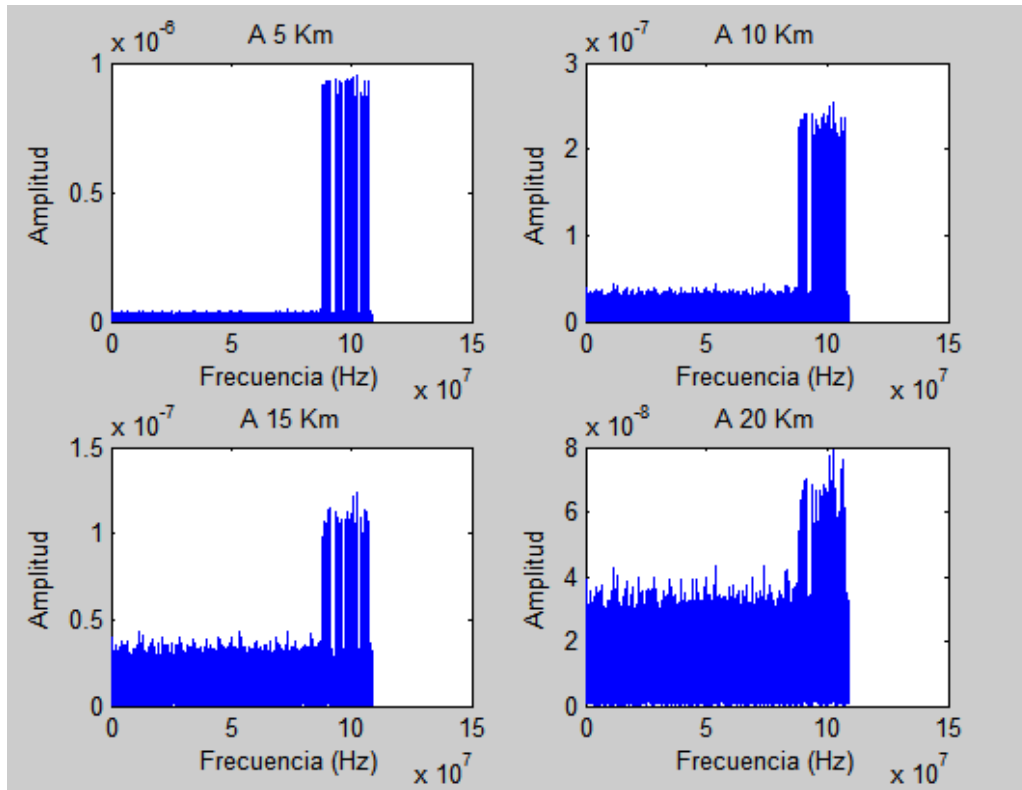


Figura 19. Atenuación del banco de señales para las distintas distancias.

Posterior a esto la señal se filtra y se verifica que canales están ocupados. Para lo cual el presente diseño se vale de dos matrices: La primera indica los niveles de potencia existentes en cada canal así como para cada distancia y la segunda nos indica los canales que se consideran como ocupados mediante la asignación de un “1” o desocupados mediante un “0”.

Para esto se ha tomado algunas porciones de la matriz, debido a su gran tamaño que no permite mostrarla de forma completa; pero que se puede visualizar en el archivo (.m) anexo al presente trabajo.

		CANALES (MHz)									
		88.1	88.3	88.5	88.7	88.9	89.1	89.3	89.5	89.7	89.9
DISTANCIA	5K	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
	10Km	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
	15Km	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2. Canales Activos y desocupados (Del canal 1 al 10 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		90,1	90,3	90,5	90,7	90,9	91,1	91,3	91,5	91,7	91,9
DISTANCIA	5Km	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	10Km	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	15Km	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3. Canales Activos y desocupados (Del canal 11 al 20 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		92,1	92,3	92,5	92,7	92,9	93,1	93,3	93,5	93,7	93,9
DISTANCIA	5Km	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	10Km	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	15Km	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4. Canales Activos y desocupados (Del canal 21 al 30 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		94,1	94,3	94,5	94,7	94,9	95,1	95,3	95,5	95,7	95,9
DISTANCIAS	5Km	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
	10Km	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
	15Km	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5. . Canales Activos y desocupados (Del canal 31 al 40 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES									
		96,1	96,3	96,5	96,7	96,9	97,1	97,3	97,5	97,7	97,9
DISTANCIA	5Km	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	10Km	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	15Km	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6. Canales Activos y desocupados (Del canal 41 al 50 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		98,1	98,3	98,5	98,7	98,9	99,1	99,3	99,5	99,7	99,9
DISTANCIA	5Km	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
	10Km	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
	15Km	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 7. Canales Activos y desocupados (Del canal 51 al 60 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		100,1	100,3	100,5	100,7	100,9	101,1	101,3	101,5	101,7	101,9
DISTANCIA	5Km	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	10Km	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	15Km	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 8. Canales Activos y desocupados (Del canal 61 al 70 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		102,1	102,3	102,5	102,7	102,9	103,1	103,3	103,5	103,7	103,9
DISTANCIA	5Km	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	10Km	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	15Km	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 9. Canales Activos y desocupados (Del canal 71 al 80 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		104,1	104,3	104,5	104,7	104,9	105,1	105,3	105,5	105,7	105,9
DISTANCIA	5Km	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
	10Km	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
	15Km	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 10. Canales Activos y desocupados (Del canal 81 al 90 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		106,1	106,3	106,5	106,7	106,9	107,1	107,3	107,5	107,7	107,9
DISTANCIA	5Km	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	10Km	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	15Km	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	20Km	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 11. . Canales Activos y desocupados (Del canal 91 al 100 de FM), según el diseño propuesto.

		CANALES (MHz)									
		88,1	88,3	88,5	88,7	88,9	89,1	89,3	89,5	89,7	89,9
DISTANCIA	5Km	-33,74	-57,61	-62,11	-56,44	-33,78	-55,25	-33,78	-55,34	-33,79	-55,47
	10Km	-47,64	-63,47	-64,32	-62,45	-47,85	-62,39	-47,84	-62,96	-47,88	-62,81
	15Km	-54,68	-63,83	-64,42	-62,98	-54,12	-63,12	-54,22	-63,71	-54,19	-63,29
	20Km	-58,66	-63,87	-64,44	-63,08	-59,24	-63,25	-59,65	-63,83	-59,36	-63,31

Tabla 12. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 1 al 10).

		CANALES (MHz)									
		90,1	90,3	90,5	90,7	90,9	91,1	91,3	91,5	91,7	91,9
DISTANCIA	5Km	-33,83	-54,91	-33,76	-55,52	-64,24	-58,08	-33,78	-56,14	-64,73	-63,92
	10Km	-48,07	-62,72	-47,7	-62,5	-64,45	-63,16	-47,83	-62,83	-64,91	-64,1
	15Km	-54,63	-63,57	-54,86	-63,33	-64,45	-63,52	-54,12	-63,34	-64,9	-64,12
	20Km	-60,04	-63,72	-59,05	-63,51	-64,45	-63,58	-59,37	-63,4	-64,9	-64,13

Tabla 13. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 11 al 20).

		CANALES (MHz)									
		92,1	92,3	92,5	92,7	92,9	93,1	93,3	93,5	93,7	93,9
DISTANCIA	5Km	-64,6	-64,19	-62,73	-62,49	-62,14	-62,36	-62,03	-56,64	-33,75	-55,49
	10Km	-64,83	-64,5	-63,37	-63,17	-63,37	-63,99	-64,28	-62,52	-47,7	-63,43
	15Km	-64,84	-64,49	-63,4	-63,18	-63,43	-64,03	-64,3	-63,01	-54,85	-64,28
	20Km	-64,84	-64,49	-63,4	-63,18	-63,44	-64,03	-64,29	-63,09	-58,98	-64,42

Tabla 14. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 21 al 30).

		CANALES (MHz)									
		94,1	94,3	94,5	94,7	94,9	95,1	95,3	95,5	95,7	95,9
DISTANCIA	5Km	-33,76	-56,16	-62,21	-57,26	-33,75	-56,82	-57,71	-33,74	-33,77	-54,25
	10Km	-47,73	-62,33	-62,69	-62,8	-47,67	-62,98	-63,75	-47,74	-47,81	-61,83
	15Km	-54,88	-62,99	-62,71	-63,26	-54,73	-63,55	-64,24	-54,01	-54,09	-62,8
	20Km	-58,97	-63,13	-62,72	-63,35	-58,74	-63,67	-64,32	-59,33	-59,33	-63,01

Tabla 15. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 31 al 40).

		CANALES (MHz)									
		96,1	96,3	96,5	96,7	96,9	97,1	97,3	97,5	97,7	97,9
DISTANCIA	5Km	-33,77	-56,26	-63,35	-62,14	-62,57	-57,31	-33,78	-57,32	-57,77	-33,71
	10Km	-47,76	-63,42	-63,58	-62,3	-63,21	-63,13	-47,85	-62,86	-63,16	-47,54
	15Km	-54,01	-63,79	-63,58	-62,3	-63,22	-63,67	-54,17	-63,07	-63,52	-54,52
	20Km	-59,32	-63,78	-63,58	-62,3	-63,22	-63,78	-59,47	-63,05	-63,57	-58,48

Tabla 16. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 41 al 50).

		CANALES (MHz)									
		98,1	98,3	98,5	98,7	98,9	99,1	99,3	99,5	99,7	99,9
DISTANCIA	5Km	-33,8	-54,31	-33,78	-55,81	-63,44	-58,22	-33,74	-54,85	-33,75	-54,52
	10Km	-47,94	-61,73	-47,78	-63,12	-63,53	-63,12	-47,58	-62,21	-47,63	-62,32
	15Km	-54,32	-62,55	-54,91	-63,82	-63,53	-63,36	-54,46	-62,98	-54,68	-63,28
	20Km	-59,55	-62,71	-58,88	-63,93	-63,52	-63,39	-58,24	-63,13	-58,76	-63,47

Tabla 17. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 51 al 60).

		CANALES (MHz)									
		100,1	100,3	100,5	100,7	100,9	101,1	101,3	101,5	101,7	101,9
DISTANCIA	5Km	-33,74	-55,1	-63	-58,96	-33,8	-55,14	-33,73	-55,4	-62,64	-58,33
	10Km	-47,6	-62,15	-63,26	-64,2	-47,9	-63,21	-47,53	-62,56	-63,05	-64,12
	15Km	-54,62	-63,03	-63,27	-64,35	-54,26	-63,93	-54,4	-63,32	-63,07	-64,64
	20Km	-58,67	-63,23	-63,27	-64,33	-59,53	-64,01	-58,24	-63,46	-63,08	-64,75

Tabla 18. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 61 al 70).

		CANALES (MHz)									
		102,1	102,3	102,5	102,7	102,9	103,1	103,3	103,5	103,7	103,9
DISTANCIA	5Km	-33,81	-54,68	-33,78	-55,34	-62,96	-63,62	-62,92	-58,67	-33,77	-56,5
	10Km	-47,93	-62,8	-47,74	-62,19	-63,93	-63,84	-62,99	-62,85	-47,72	-62,86
	15Km	-54,4	-63,8	-54,82	-62,68	-63,97	-63,86	-62,98	-62,88	-54,82	-63,19
	20Km	-59,91	-63,99	-58,78	-62,74	-63,97	-63,86	-62,98	-62,84	-58,84	-63,19

Tabla 19. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 71 al 80).

		CANALES (MHz)									
		104,1	104,3	104,5	104,7	104,9	105,1	105,3	105,5	105,7	105,9
DISTANCIA	5Km	-63,39	-58,11	-33,8	-33,82	-55,28	-63,24	-63,88	-58,39	-33,75	-55
	10Km	-63,53	-63,45	-47,94	-48	-63,31	-64,12	-63,98	-63,17	-47,6	-62,37
	15Km	-63,54	-63,82	-54,39	-54,52	-64	-64,14	-63,98	-63,43	-54,58	-62,93
	20Km	-63,54	-63,87	-59,76	-59,99	-64,06	-64,14	-63,98	-63,45	-58,53	-62,99

Tabla 20. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 81 al 90).

		CANALES (MHz)									
		106,1	106,3	106,5	106,7	106,9	107,1	107,3	107,5	107,7	107,9
DISTANCIA	5Km	-33,76	-55,62	-63,3	-58,12	-33,76	-54,86	-33,81	-54,82	-60,83	-63,31
	10Km	-47,64	-62,81	-63,89	-62,65	-47,58	-62,9	-47,73	-62,28	-62,35	-64,27
	15Km	-54,68	-63,32	-63,91	-63	-54,51	-63,63	-54,85	-62,93	-62,41	-64,29
	20Km	-58,73	-63,36	-63,91	-63,06	-58,42	-63,72	-59,02	-63,02	-62,42	-64,29

Tabla 21. Valores de potencia obtenidos para cada canal a distintas distancias (Canales del 91 al 100).

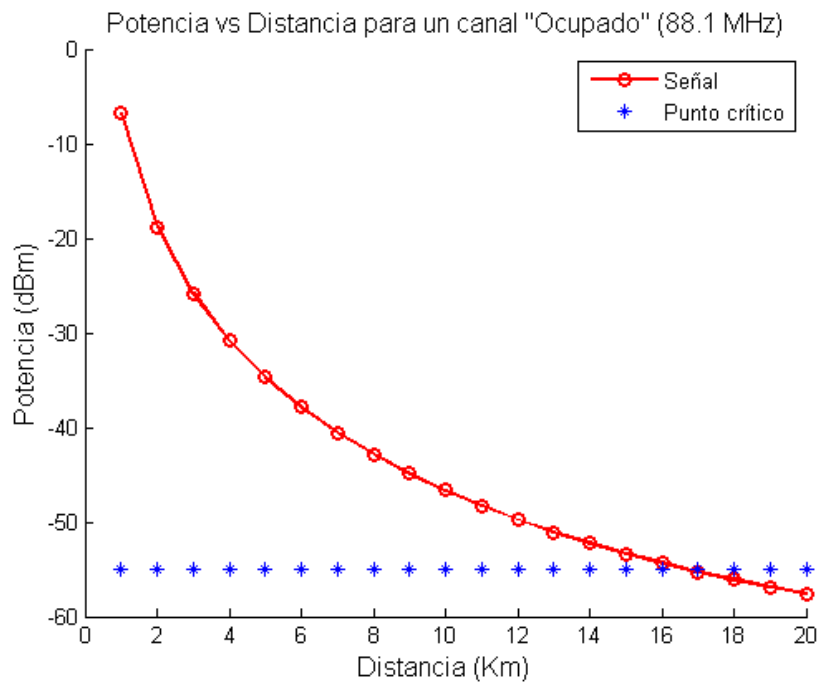


Figura 20. Variación de potencia para el canal de la emisora “Luz y Vida FM” de la ciudad de Loja, conforme aumenta la distancia.

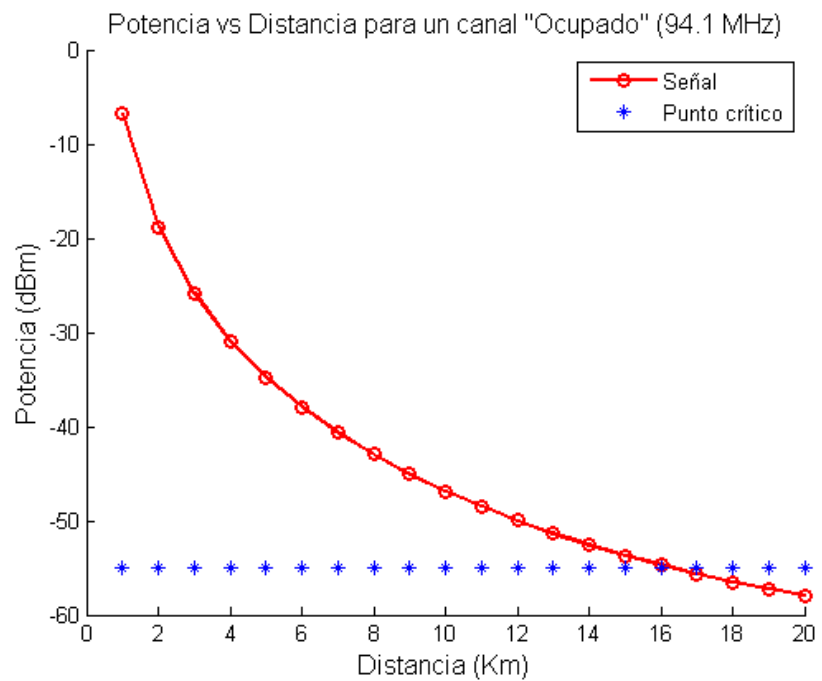


Figura 21. Variación de potencia para el canal de la emisora “Ondas de Esperanza 94.1 FM” de la ciudad de Loja, conforme aumenta la distancia.

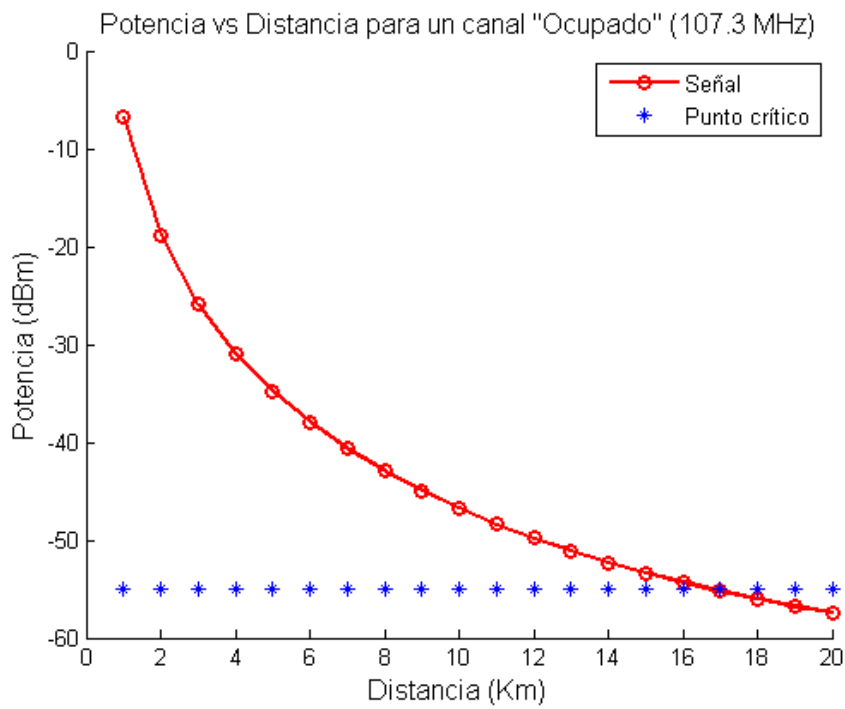


Figura 22. Variación de potencia para el canal de la emisora “J. C Radio” de la ciudad de Loja, conforme aumenta la distancia.

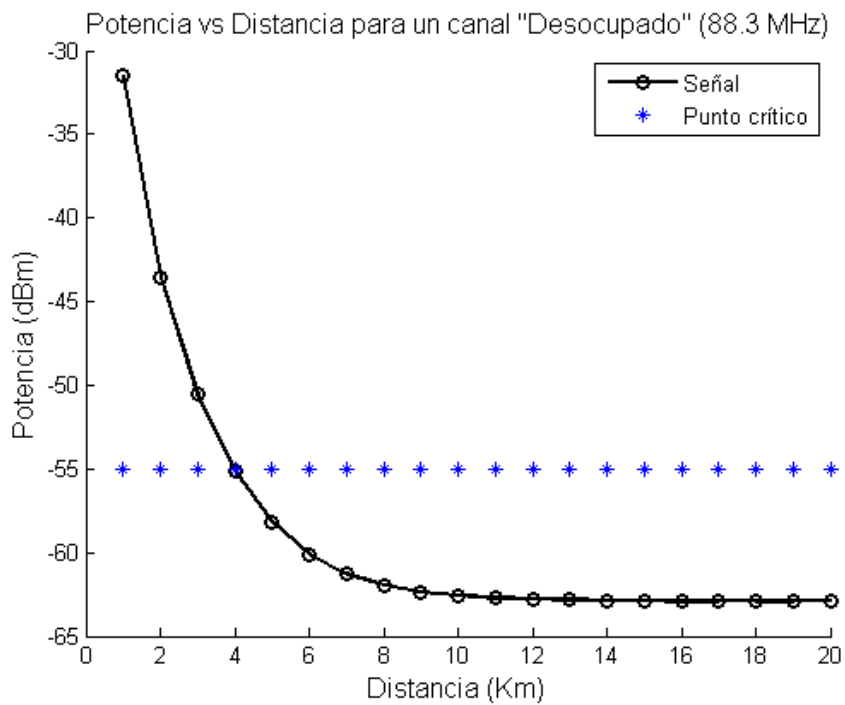


Figura 23. Variación de potencia obtenida para un canal desocupado en 88.3 MHz conforme aumenta la distancia.

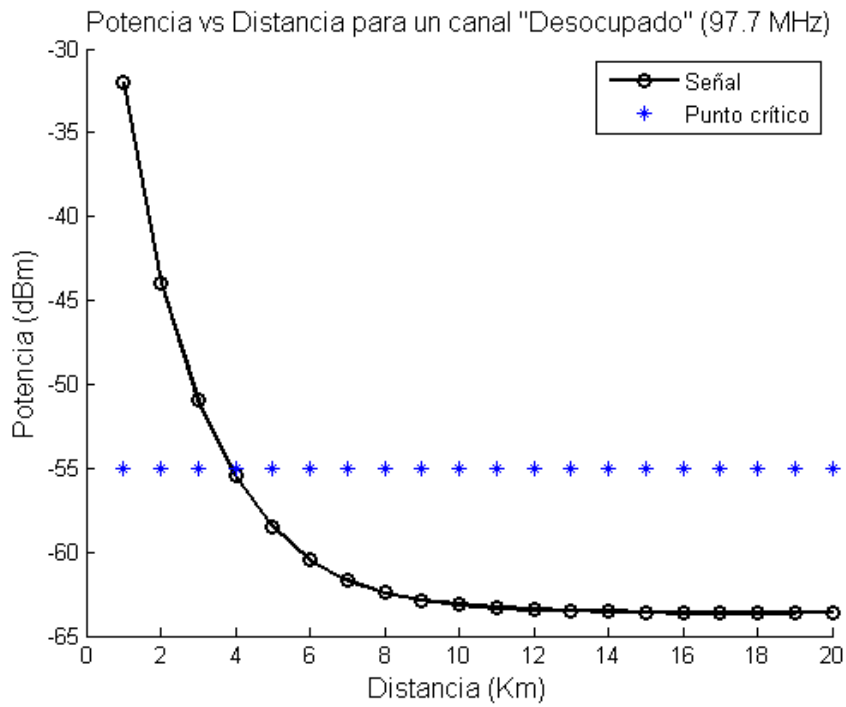


Figura 24. Variación de potencia obtenida para un canal desocupado en 97.7 MHz conforme aumenta la distancia.

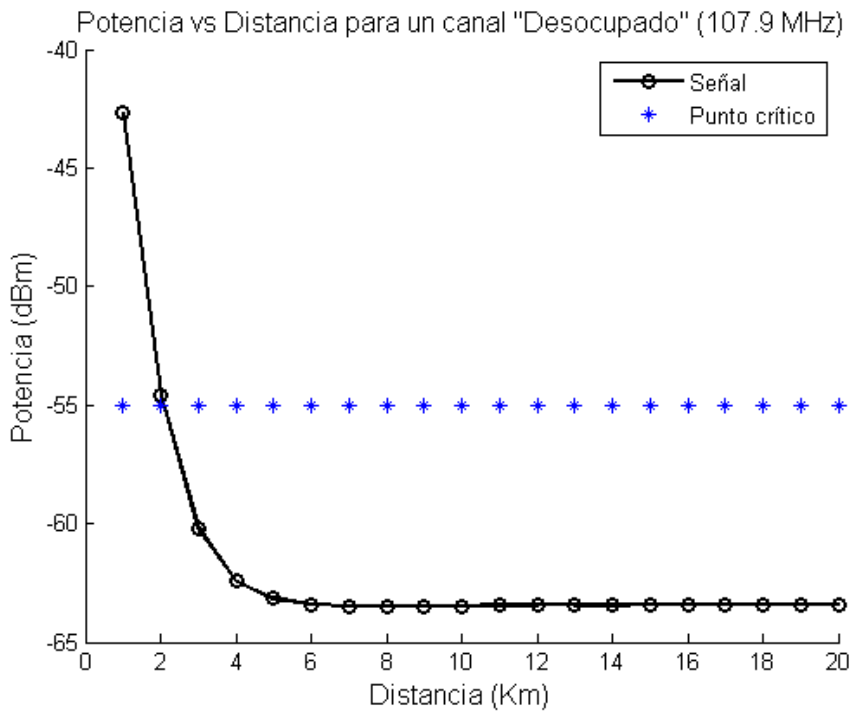


Figura 25. Variación de potencia obtenida para un canal desocupado en 107.9 MHz conforme aumenta la distancia.

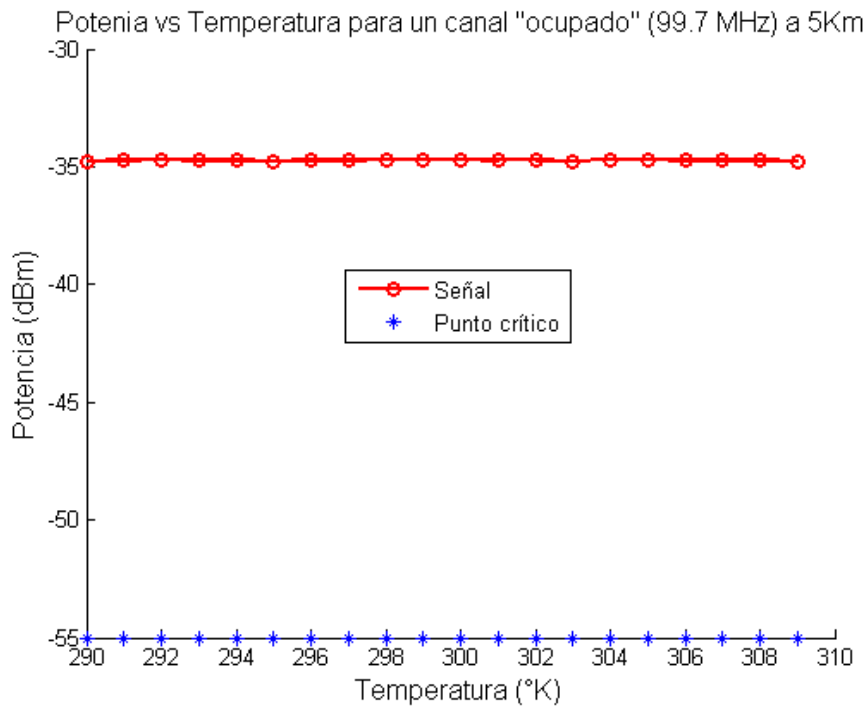


Figura 26. Variación de potencia para un canal ocupado en 99.7 MHz a una distancia fija de 5Km y conforme aumenta la temperatura.

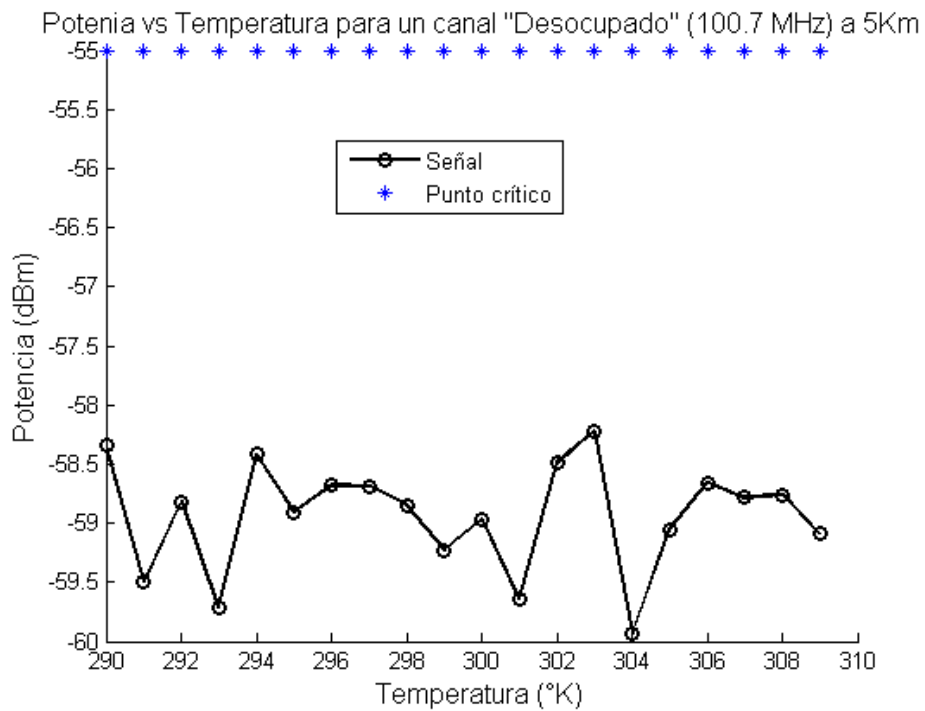


Figura 27. Variación de potencia para un canal desocupado en 100.7 MHz a una distancia fija de 5Km y conforme aumenta la temperatura.



Figura 28. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 5 Km y 290 ° K.

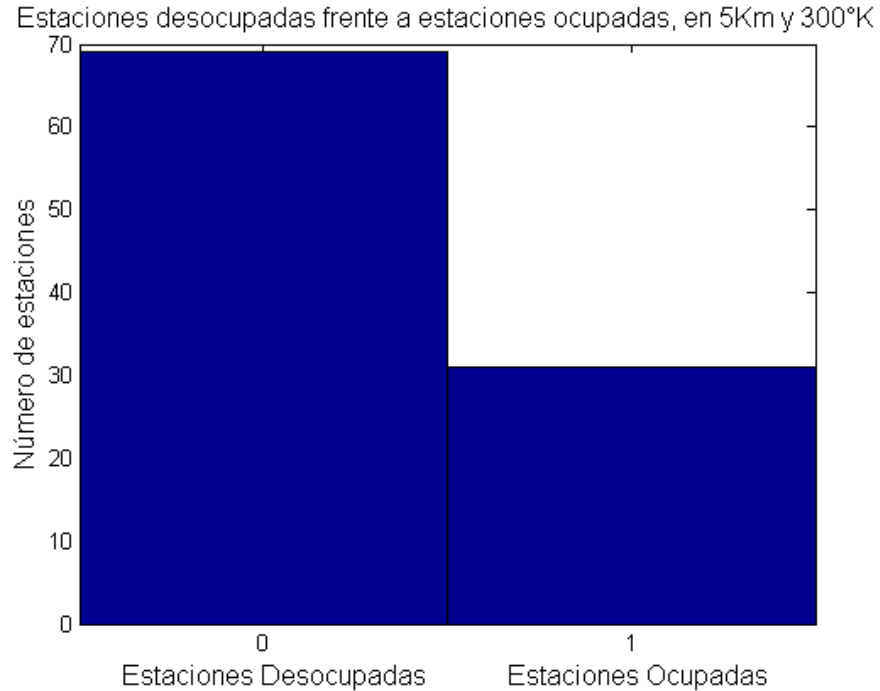


Figura 29. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 5 Km y 300 ° K.



Figura 30. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 5 Km y 309 ° K.

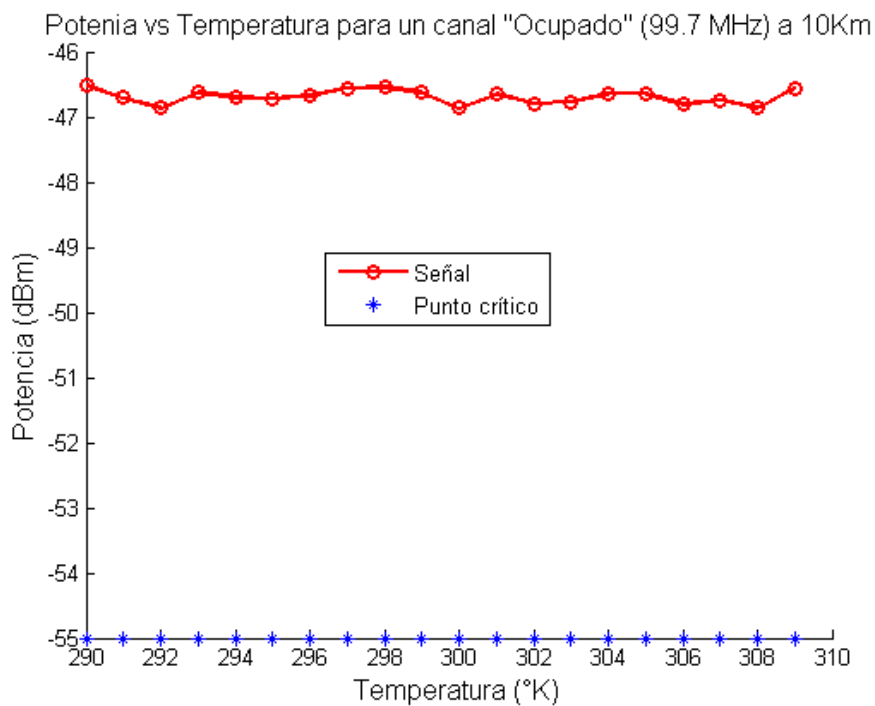


Figura 31. Variación de potencia para un canal ocupado en 99.7 MHz a una distancia fija de 10Km, conforme aumenta la temperatura.

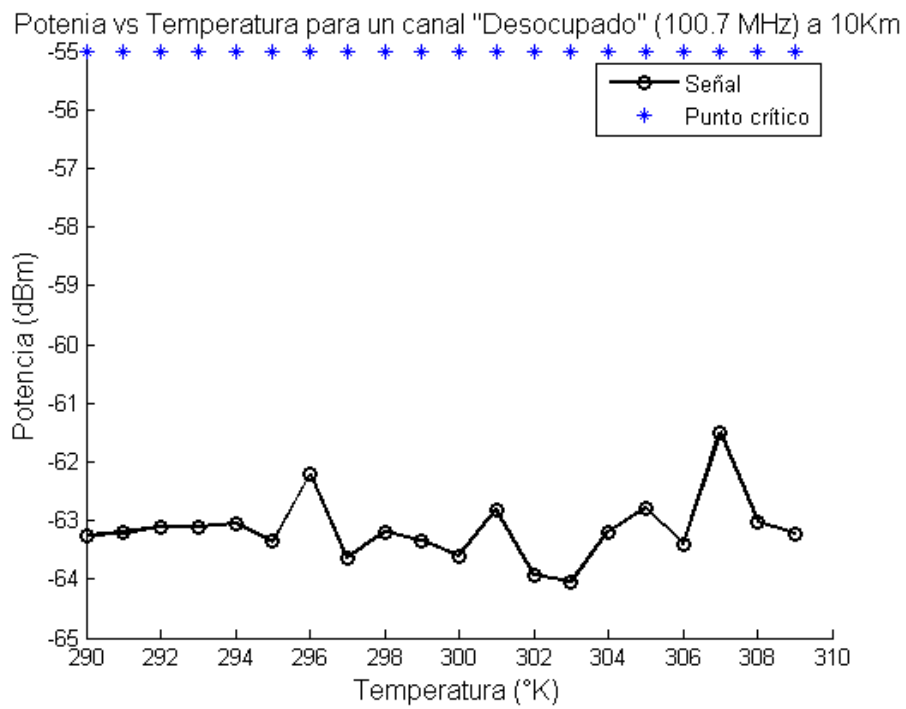


Figura 32. Variación de potencia para un canal desocupado en 100.7 MHz a una distancia fija de 10Km y conforme aumenta la temperatura.



Figura 33. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 10 Km y 290 ° K.



Figura 34. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 10 Km y 300 ° K.



Figura 35. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 10 Km y 309 ° K.

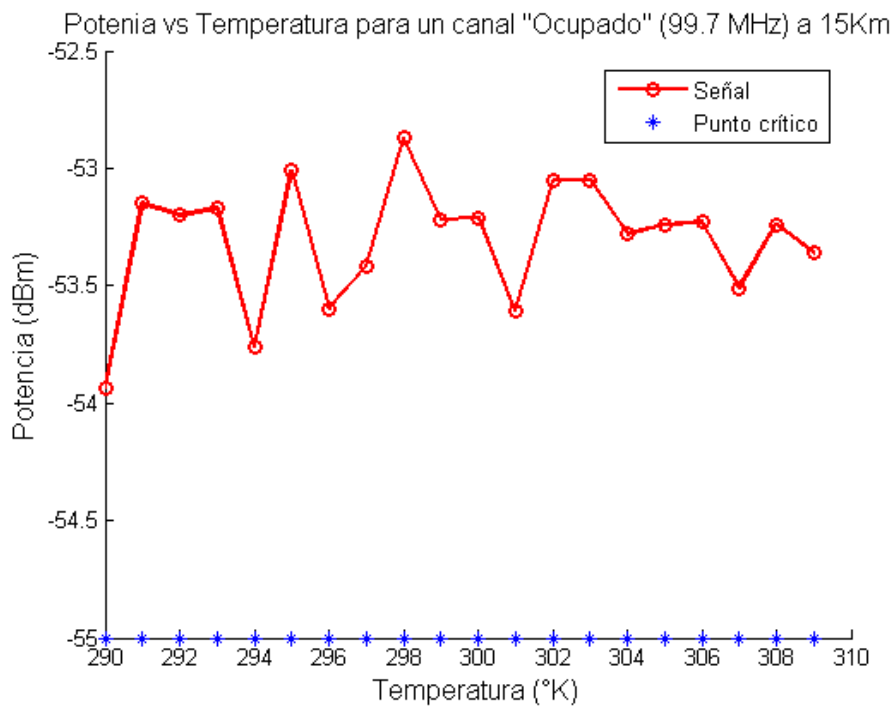


Figura 36. Variación de potencia para un canal ocupado en 99.7 MHz a una distancia fija de 15Km, conforme aumenta la temperatura.

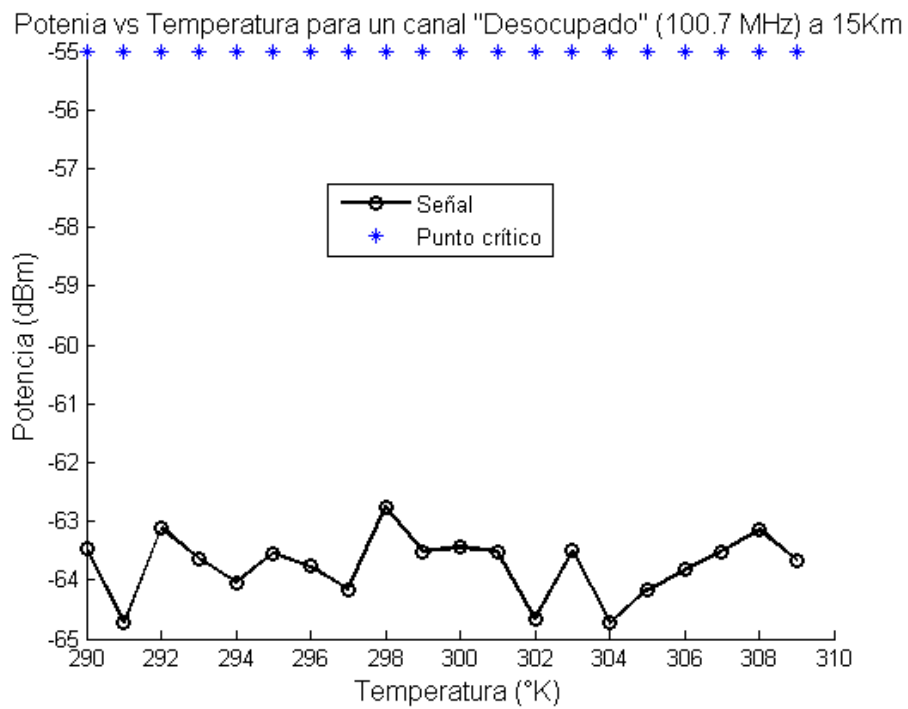


Figura 37. Variación de potencia para un canal desocupado en 100.7 MHz a una distancia fija de 15Km, conforme aumenta la temperatura.



Figura 38. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 15 Km y 290 ° K.



Figura 39. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 15 Km y 300 ° K.



Figura 40. Histograma representativo sobre resultados de ocupación a una distancia de 15 Km y 309 ° K.

7. Discusión

7.1. Banco de señales de entrada.

Como se ha mostrado en el desarrollo del diseño del presente detector de energía orientado a las aplicaciones de CR, para poder analizar su funcionalidad, estudiar, y evaluar su funcionamiento en distintos escenarios, se ha requerido del diseño de un banco de señales moduladas en frecuencia que aporten con la energía para poner a prueba el presente trabajo.

El resultado de este banco de señales se puede visualizar en la figura 14. El cual consta de 31 señales activas, que simula las 31 emisoras de radio existentes en la ciudad de Loja según el estudio realizado en [2].

Cada una de estas señales se ha generado de manera independiente y al final se han concatenado para formar una señal única que idealmente sería lo que percibe el detector. Cada señal se ha generado de manera similar, con los parámetros mencionados en la sección de diseño.

7.2. Señales, añadido ruido y pérdidas.

La señal FM en conjunto representada por la figura 14, es una señal ideal que por sí sola no es de gran utilidad para el propósito del presente trabajo. Para que la señal pueda asemejarse a las transmisiones reales que recibiría el detector en un ambiente de difusión verdadero, dicha señal ideal debe ser “contaminada” por distintos factores que atenúan la señal.

Tomando en cuenta lo anterior, se ha considerado tanto las pérdidas en el espacio libre, especificadas en la ecuación (11), como el ruido basado en la temperatura, es decir ruido térmico.

Los resultados de esta “contaminación” se pueden verificar en las Figuras 15, 16, 17, 18 y 19.

En la figura 15 se tiene el resultado de una señal que ha viajado 5Km desde el transmisor hasta en detector de energía. Allí se puede observar como la amplitud de la

señal se ha disminuido de manera considerable debido a las pérdidas asociadas a la distancia y la frecuencia. Así mismo se puede observar el ruido distribuido a lo largo de la banda FM.

En la Figura 16 ocurre exactamente lo mismo, pero a una distancia de 10Km, lo que se traduce en mayores pérdidas y donde la influencia del ruido empieza a ser más notoria.

En la Figura 17 se tiene la misma situación a 15Km, donde los efectos antes mencionados, cada vez cobran mayor relevancia.

En la Figura 18 se puede ver con mayor facilidad que la señal se encuentra muy atenuada lo cual dificulta su estimación para el detector por hallarse muy próxima a los niveles de ruido.

En la Figura 19 se observan las cuatro figuras anteriores para una comparación más eficaz.

7.3. Evaluación del detector de energía.

El diseño del detector empezando por la parte de filtrado se explica en el apartado 5.2.1.3. Ahora se evaluará los resultados que se obtienen al aplicar el modelado de señales FM con ruido y pérdidas que se ha obtenido y explicado en la sección anterior.

Lo que se tiene es una sola señal en conjunto que representa el espectro de la banda FM, que va de los 88MHz hasta los 108MHz, representada por el modelado de la sección anterior. El detector de energía debe recibir toda esa señal e ir analizando la misma canal por canal, mediante un filtro y decidir si existe o no la presencia de una señal.

Para evaluar los resultados se ha escogido un rango de funcionamiento desde 5Km hasta los 15Km. Esto debido a las numerosas pruebas realizadas con anterioridad, las cuales indican que este es el rango donde el detector tiene su mayor eficacia. Esto se lo ha hecho en rangos de 5Km para reducir el tiempo de procesamiento, sin embargo este software puede analizar kilómetro por kilómetro sin problema alguno.

7.3.1. Resultados de señales presentes o ausentes según el análisis del detector para un rango de entre 5Km y 15 Km.

Desde la Tabla 3 hasta la 12, se indica los resultados obtenidos de presencia o ausencia de señal según el análisis realizado por el detector de energía. En estas tablas se puede verificar que todas y cada una de las emisoras simuladas han sido detectadas con éxito, a excepción de la fila correspondiente a los 20Km, donde el nivel de señal baja demasiado según el umbral seleccionado.

El umbral con el que se ha trabajado corresponde a la norma de recepción mínima en equipos FM, especificada en el Anexo 7. Este valor corresponde a estudios previos realizados y por lo tanto son válidos para nuestro trabajo.

Como se observará en secciones posteriores, con el presente diseño, para distancias superiores a los 15Km, el detector pierde la total eficacia que muestra desde los 5Km hasta los 15Km. Así mismo se presenta un inconveniente en distancia muy pequeñas, esto es inferiores a 5Km donde por la naturaleza del diseño del banco de señales FM el nivel de ruido sube demasiado y se confunde con las señales presentes, por lo tanto en rango de distancia que se ha encontrado óptimo para el presente diseño está comprendido entre las distancias antes mencionadas.

7.3.2. Resultados de potencia exacta para cada canal según el análisis del detector para un rango de entre 5Km y 15Km.

Desde la Tabla 13 hasta la 22 se muestran cada uno de los niveles de potencia obtenido en los canales respectivos, así mismo en el rango de trabajo óptimo para el detector diseñado.

Como se puede observar estos niveles de potencia no varían drásticamente, pero varían de todos modos al tomar en cuenta los valores aleatorios del ruido.

7.3.3. Fluctuación de Potencia conforme aumenta la distancia en un rango de 1Km a 20Km.

En las Figuras 20, 21 y 22 se muestran la variación de potencia en tres canales distintos de la banda FM conforme aumenta la distancia.

Para este caso se muestran los resultados en un intervalo de distancias que van desde 1Km hasta 20Km.

Lo que en realidad interesa de estas gráficas es la forma que presentan, pues se ve claramente que son curvas exponenciales decrecientes. A menor distancia la potencia detectada es mayor, lo cual resulta lógico y muestra que el detector funciona de manera correcta.

En estas tres gráficas se muestra también el punto crítico del sistema, que corresponde al umbral mediante el cual se está tomando las decisiones. Mediante esto se puede observar, por qué el rango de trabajo que se ha mencionado anteriormente es el óptimo.

Además de ver algo lógico como es el hecho de que los niveles de potencia decrecen a mayores distancia, esto da una idea de la probabilidad de detección mencionada en la teoría, pues la misma presentará una curva muy similar donde la probabilidad para detectar una señal, disminuirá conforme la distancia se incremente, y es esto en realidad lo que más nos interesa.

En contraparte están las Figuras 23, 24 y 25 que representan canales desocupados y como se puede observar, el punto de inflexión indica que para distancias menores a los 5Km se presenta la situación mencionada con anterioridad y que puede traer inconvenientes, razón por la cual se ha tomado como rango óptimo de trabajo el que va de los 5Km a los 15Km; sin embargo cuando se sometiera el detector a señales reales este panorama debería cambiar, ya que dicho inconveniente está relacionado con el modelado del ruido.

7.3.4. Fluctuación de Potencia conforme varía la temperatura a una distancia de 5Km del transmisor.

Ahora otro parámetro que puede influenciar en el desempeño del sistema es la temperatura, para esto las figuras 26, 27, 28, 29 y 30 aportan información valiosa para evaluar el diseño presentado.

En la figura 26 se tiene la variación de potencia en un canal ocupado, a una distancia fija de 5Km conforme aumenta la temperatura en un rango de 290°K hasta los 309°k.

Lo que se puede observar es que a esta distancia las fluctuaciones no son muy exageradas conforme la temperatura aumenta.

En la figura 27 se tiene el mismo caso, pero con un canal desocupado. Aquí existen mayores variaciones, ya que el ruido existente depende básicamente de la temperatura; sin embargo no es de mayor interés por hallarse muy por debajo de nuestro punto de inflexión.

Las figuras 28, 29 y 30 muestran histogramas representativos del número de canales desocupados frente al número de canales ocupados a una distancia de 5Km y temperaturas de 290°K, 300°K y 309°k respectivamente.

Esto ayuda a ratificar la eficacia del diseño a esta distancia, ya que se puede visualizar que en los tres casos se obtienen 31 canales ocupados que son los simulados en un principio, representado las 31 emisoras de radio presentes en la ciudad de Loja.

7.3.5. Fluctuación de Potencia conforme varía la temperatura a una distancia de 10Km del transmisor.

En las figuras 31, 32, 33, 34 y 35 se muestra la misma mecánica del apartado anterior, pero tomando en cuenta una distancia de 10Km desde el transmisor hasta el detector.

Lo importante a recalcar en este punto es que aquí es más notoria la variación presentada en la potencia, conforme aumenta la temperatura. Se puede observar que la variación presenta un carácter aleatorio; sin embargo no presenta problema por hallarse muy por arriba del umbral preestablecido.

En el caso del canal desocupado se presenta un caso similar al apartado anterior donde el ruido varía al ser de carácter térmico, pero no presenta mayor problema a esta distancia.

Los histogramas de las tres siguientes figuras muestran nuevamente para los mismos valores de temperatura del apartado anterior que se detecta con gran éxito todas las emisoras existentes.

7.3.6. Fluctuación de Potencia conforme varía la temperatura a una distancia de 15Km del transmisor.

Finalmente desde la figura 36 hasta la 40 se muestran las variaciones de potencia conforme varía la temperatura a una distancia de 15Km.

En la figura 36 se observan las variaciones que presenta la potencia, en este caso son más abruptas que en los anteriores, debido al aumento de distancia y también presenta el carácter aleatorio; sin embargo esta señal aún está por encima del umbral seleccionado y no representa problemas.

En la figura 37 se tiene el caso opuesto, donde solo está el ruido, sin embargo no es de mayor relevancia.

En las figuras 38, 39 y 40 se muestran tres nuevos histogramas para verificar el número de canales con señales presentes. Nuevamente se puede verificar que la eficacia a esta distancia es óptima.

8. Conclusiones

- Mediante la revisión de literatura se ha comparado los distintos detectores de espectro, definiendo sus características, ventajas y desventajas en la tabla 1. El método más viable para el presente trabajo resulta ser la detección de energía, por no requerir información (parámetros, tipo de modulación, etc.) de la señal a detectar (Filtro Adaptado y Características Cicloestacionarias si lo requieren), esto lo hace menos complejo. La desventaja radica en escoger el umbral, pero en este caso se cuenta con la normativa de ARCOTEL donde se especifica la intensidad mínima que deben presentar las señales de radio FM; entonces esta desventaja pierde fuerza para el presente estudio.
- Como se pudo observar en la teoría, la detección de energía resulta el medio más viable para el presente trabajo; por lo tanto se ha reunido expresiones matemáticas como la energía de una señal, la herramienta FDATool y la FFT de MATLAB, expresiones de pérdidas y ruido, entre otras, que se han acoplado y mediante las cuales se ha logrado diseñar el detector de energía, objetivo del presente trabajo.
- La evaluación del diseño ha podido verificar la validez del mismo y ha permitido determinar un rango óptimo de trabajo, que comprende desde los 5Km hasta los 15Km, en el que se detectará cualquier señal que se encuentre por arriba del umbral establecido, para el presente trabajo esto es -55dBm. Por otro lado, de ser el caso en situaciones con señales reales, este rango de trabajo debería aumentar teniendo un buen desempeño también para distancias inferiores a 5Km, debido a que en el presente caso de estudio se muestra el inconveniente del ruido, precisamente por el modelado hecho mediante MATLAB.
- El diseño y la posterior evaluación del detector en circunstancias próximas a la realidad de la difusión radioeléctrica en la ciudad de Loja (modeladas en el presente trabajo) contribuyen al establecimiento de acciones que evidencian el potencial uso de los sistemas de RC dentro de porciones del espectro radioeléctrico que pueden ser optimizadas. Los estudios que reflejan alrededor de un 70% de disponibilidad en esta banda y los resultados mostrados en el presente trabajo lo viabilizan.

Seguramente este diseño de detector virtual contribuye en una sola simulación a obtener resultados medidos a Kilómetros de distancia (hasta 15Km) en tan solo minutos y observar un aproximado de cómo se comportarían las diferentes emisiones de radio en el espacio espectral asignado para radiodifusión en FM.

9. Recomendaciones

- Antes de realizar este tipo de proyectos se debe hacer una amplia revisión de bibliografía sobre estudios anteriores relacionados al tema. En muchos casos existen trabajos que sirven y son la base para realizar nuevos diseños, facilitando las cosas y acortando el tiempo de trabajo. En el presente caso se ha utilizado estudios y documentos previos, con lo cual el trabajo de campo se ha reducido, ya que algunas cosas como mediciones espectrales ya se encontraban efectuadas.
- Como líneas futuras de investigación se puede proponer la implementación del presente diseño, para lo cual se deberá seleccionar algún dispositivo disponible en el mercado que pueda procesar la información requerida por el sistema o en su defecto construir un dispositivo. Además se tendrá que trabajar en la adquisición de la señal de entrada, para lo cual se necesitará de una antena apropiada, dando apertura a trabajos futuros para la mejora de los estudios aquí efectuados.
- Otra opción de la implementación sería utilizar el mismo MATLAB para el procesamiento, pero con ello se deberá trabajar aún más en la optimización del código, para así obtener una mayor velocidad de procesamiento que es lo requerido.

10. Bibliografía

- [1] G. Youngblood, “A Software-Defined Radio for the Masses, Part 1”, The National Association for Amateur Radio, November 2002.
- [2] A. F. Vega, “EVALUACIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO VHF/UHF EN PARROQUIAS URBANAS Y RURALES DEL CANTÓN LOJA PARA EL DESPLIEGUE DE SISTEMAS DE RADIO COGNITIVA”, Tesis de Maestría, ESPE, Quito, 2013.
- [3] B. A. Fette, “History and Background of Cognitive Radio Technology, ”. in *Cognitive Radio Technology*, B. A. Fette, Ed. Elsevier: USA, 2006, pp. 1-28.
- [4] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, Y. T. Hou, “When radio meets software, ”. in *Cognitive Radio Communications and Networks. Principles and Practice*, A. M. Wyglinski, M. Nekovee, Y. T. Hou, Ed. Elsevier: USA, 2010, pp. 1-13.
- [5] M. D. Cereceda, “DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN DETECTOR DE ENERGÍA PARA SEÑALES FM WIRELESS MICROPHONE EN RADIO COGNITIVA”, Proyecto final de carrera, Dep. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2011.
- [6] J. H. Aguilar, A. Navarro, “Radio cognitiva – Estado del arte”, *Revista Sistemas y Telemática* vol. 9, pp. 31-50, Mar. 2011.
- [7] J. Mitola III, “Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio”, PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [8] ITU Wp8A, “Working document towards a preliminary draft new report - Cognitive radio systems in the land mobile service” [online], 2007 Disponible en: <http://www.itu.int/md/R03-WP8A-C-0555/en>.
- [9] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [10] S. Molina, “Análisis y caracterización de la ocupación espectral en entornos urbanos exteriores e interiores en el contexto de redes Cognitive Radio de acceso

dinámico al espectro”, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2009.

[11] J. Mitola III, “Cognitive Radio Evolution, ”. in *Cognitive Radio Communications and Networks. Principles and Practice*, A. M. Wyglinski, M. Nekovee, Y. T. Hou, Ed. Elsevier: USA, 2010, pp. 587-618.

[12] H. R. Márquez, “Arquitecturas de radio cognitiva: una revisión actual”, revisión, Universidad Distrital Francisco José Caldas, Bogotá, 2013.

[13] I. Akyildiz, W. Lee, M. Vuran, S. Mohanty, “NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey”, *Computer Networks* vol. 50, pp. 2127-2159, Sept. 2006.

[14] C. Rieser, “Biologically Inspired Cognitive Radio Engine Model Utilizing Distributed Genetic Algorithms for Secure and Robust Wireless Communications and Networking”, Ph.D. Dissertation, Virginia Tech, Aug. 2004.

[15] J. Neel, “Analysis and Design of Cognitive Radio Networks and Distributed Radio Resource Management Algorithms”, Ph.D. Dissertation, Virginia Tech, Sep. 2006.

[16] M. T. Malavia, “DETECCIÓN DE SEÑAL BASADA EN CICLOESTACIONARIEDAD PARA COGNITIVE RADIO”, Proyecto final de carrera, Dep. de Teoría de Señal y Comunicaciones, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.

[17] M. Haddad. A Hayar, “Spectral Efficiency of Spectrum Pooling Systems”, Mobile Communications Group, Institut Eurecom, Francia, Abr. 2010.

[18] D. Cabric, S. M. Mishra, D. Willkomm, R. Brodersen, A. Wolisz, “A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum”, Proc. 14th IST mobile and Wireless Communications Summit, June 2005.

[19] E. P. Simancas, “Análisis del Estándar IEEE 802.22 (Wireless Regional Area Network (WRAN)) y su Posible Implementación en Ecuador”, Proyecto final de carrera, Escuela de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2006.

- [20] L. F. Pedraza, F. Forero I. P. Páez, “Detección de espectro para radio cognitiva”, *Revista chilena de ingeniería* vol. 20, pp. 197-210, Jun. 2012.
- [21] Q. Zhao, A. Swami, “Spectrum sensing and identification, ”. in *Cognitive Radio Communications and Networks. Principles and Practice*, A. M. Wyglinski, M. Nekovee, Y. T. Hou, Ed. Elsevier: USA, 2010, pp. 85-109.
- [22] M. T. Malavia, “DETECCIÓN DE SEÑAL BASADA EN CICLOESTACIONARIEDAD PARA COGNITIVE RADIO”, Proyecto final de carrera, Dep. de Teoría de Señal y Comunicaciones, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2009.
- [23] R. Bordón, S. Montejó, “La Radio Cognitiva y su Impacto en el Uso Eficiente del Espectro de Radio”, *RIELAC (Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones)* vol. XXXVI, pp. 42-55, Abr. 2015.
- [24] H. Mehta, “Recent Advances in Cognitive Radios”, paper, Dep. Computer Science & Engineering, Washington University in St. Louis, San Luis, 2014.
- [25] D. Cabric, S. Mubaraq Mishra, R. W. Brodersen, “Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios”, paper, Berkeley Wireless Research Center, University of California, Berkeley.
- [26] W. Tomasi, “Transmisión por Modulación Angular,”. en *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, W. Tomasi, Ed. Pearson Educación: México, 2003, pp. 228-274.
- [27] Ley de Radiodifusión y Televisión de la República del Ecuador. Última modificación: 13 de Octubre del 2011.
- [28] W. Tomasi, “Introducción a las Comunicaciones Electrónicas,”. en *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, W. Tomasi, Ed. Pearson Educación: México, 2003, pp. 1-50.
- [29] W. Tomasi, “Propagación de las Ondas Electromagnéticas,”. en *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, W. Tomasi, Ed. Pearson Educación: México, 2003, pp. 347-370.

[30] ARCOTEL. NORMA TÉCNICA PARA EL SERVICIO DE RADIODIFUSIÓN SONORA EN FRECUENCIA MODULADA ANALÓGICA. 2015.

11. Anexos

11.1. Anexo 1. Características técnicas del título habilitante para Radio Municipal de la ciudad de Loja, otorgado por la ARCOTEL

2. MATRIZ DE LA CIUDAD DE LOJA

ÁREA DE COBERTURA PRINCIPAL:	LOJA, CATAMAYO, LOCALIDADES COMPRENDIDAS DENTRO DEL BORDE DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO DE 54 dB μ V/m
------------------------------	---

UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y ALTURAS:

N°	UBICACIÓN	PROVINCIA	COORDENADAS		ALTURA s.n.m. (mts)
			LATITUD	LONGITUD	
1	Estudio: Ciudad de Loja, José Antonio Eguiguren y Bolívar	Loja	03°59'24,53" S	79°12'18,04" W	2056
2	Transmisor: Cerro Guachichambo (Ventanas)	Loja	04°01'22,00" S	79°14'48,00" W	2744

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN:

FRECUENCIA DE OPERACIÓN:	90.1 MHZ
TIPO DE EMISIÓN:	220KF8EHN
ANCHO DE BANDA AUTORIZADO:	220 kHz
TIPO Y FORMA DE ANTENA:	ARREGLO DE 4 RADIADORES TIPO ANILLO
POLARIZACIÓN:	CIRCULAR
ÁNGULOS DE AZIMUT DE MÁXIMA RADIACIÓN:	360°
N° DE ANTENAS DEL SISTEMA RADIANTE:	4
ÁNGULO DE INCLINACIÓN:	3.5°
GANANCIA MÁXIMA DEL ARREGLO:	4 dBd
TIPO Y ALTURA DE LA TORRE:	AUTOSOPORTADA DE 36 m.
POTENCIA MÁXIMA AUTORIZADA DE OPERACIÓN DEL EQUIPO TRANSMISOR):	1000 W
PÉRDIDAS EN CABLES Y CONECTORES:	1.5 dB
POTENCIA EFECTIVA RADIADA (P.E.R.):	1778.28 W

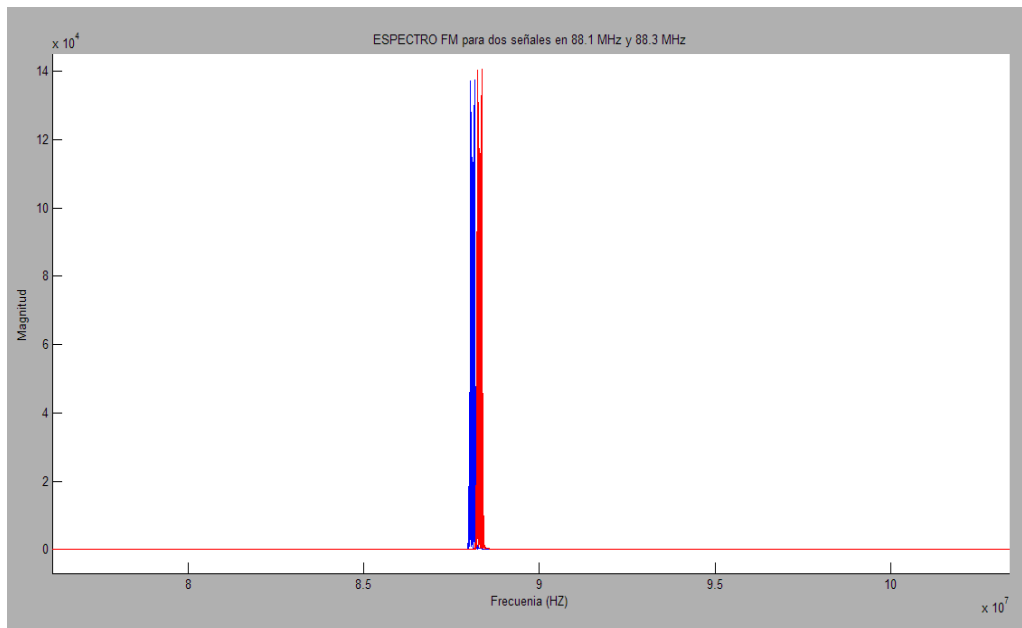
11.2. Anexo 2. Lista de Emisoras de radio en la ciudad de Loja según [2]

CANAL	EMISORA	FRECUENCIA (MHz)
1	Luz y Vida FM	88.1
2		88.3
3		88.5
4		88.7
5	La Hechicera 88.9 FM	88.9
6		89.1
7	RS Musical	89.3
8		89.5
9	Semillas de Amor	89.7
10		89.9
11	Municipal FM	90.1
12		90.3
13	Radio Pública	90.5
14		90.7
15		90.9
16		91.1
17	El Cisne	91.3

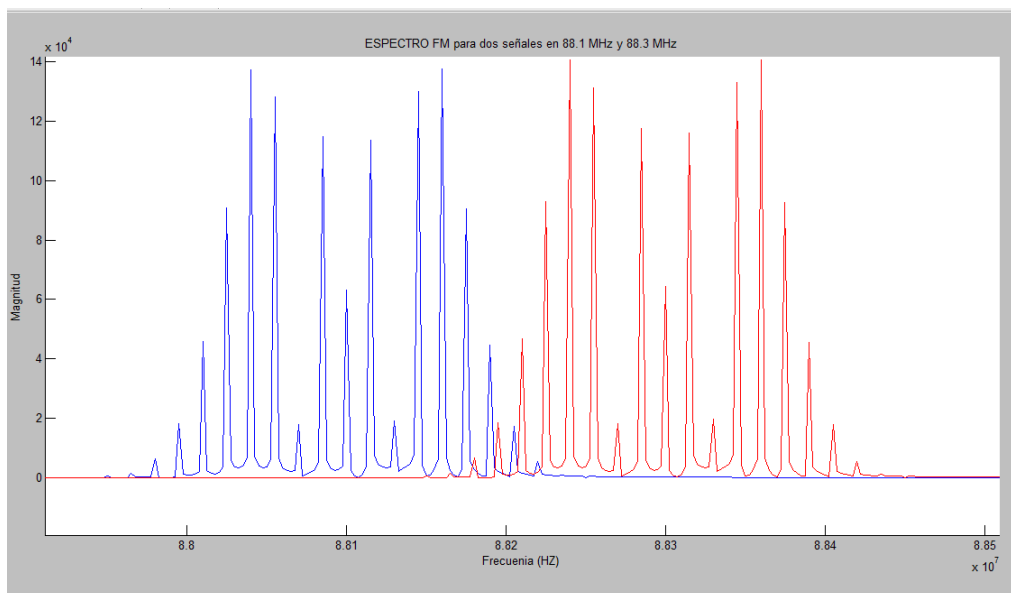
18		91.5
19		91.7
20		91.9
21		92.1
22		92.3
23		92.5
24		92.7
25		92.9
26		93.1
27		93.3
28		93.5
29	Boquerón FM	93.7
30		93.9
31	Ondas de Esperanza 94.1 FM	94.1
32		94.3
33		94.5
34		94.7
35	Misión San Antonio	94.9
36		95.1
37		95.3
38	Poder	95.5
39	Radio Legislativa	95.7
40		95.9
41	Zapotillo FM	96.1
42		96.3
43		96.5
44		96.7
45		96.9
46		97.1
47	Radio Corporación 97.3 FM	97.3
48		97.5
49		97.7
50	Loja 97.9 FM	97.9
50	Kocodrilo Radio 98.1 FM	98.1
52		98.3
53	Estación de Radio y TV Universitaria	98.5
54		98.7
55		98.9
56		99.1
57	Sociedad FM	99.3
58		99.5
59	La Voz del Santuario	99.7
60		99.9

61	Matovelle FM	100.1
62		100.3
63		100.5
64		100.7
65	Satelital	100.9
66		101.1
67	Caravana	101.3
68		101.5
69		101.7
70		101.9
71	Ecuasur FM	102.1
72		102.3
73	Vilcabamba Stereo	102.5
74		102.7
75		102.9
76		103.1
77		103.3
78		103.5
79	Sonorama FM	103.7
80		103.9
81		104.1
82		104.3
83	Cariamanga FM	104.5
84	Super Laser Panamericana	104.7
85		104.9
86		105.1
87		105.3
88		105.5
89	Mix FM	105.7
90		105.9
91	Planeta FM Stereo	106.1
92		106.3
93		106.5
94		106.7
95	Rumba Estereo	106.9
96		107.1
97	J. C Radio	107.3
98		107.5
99		107.7
100		107.9

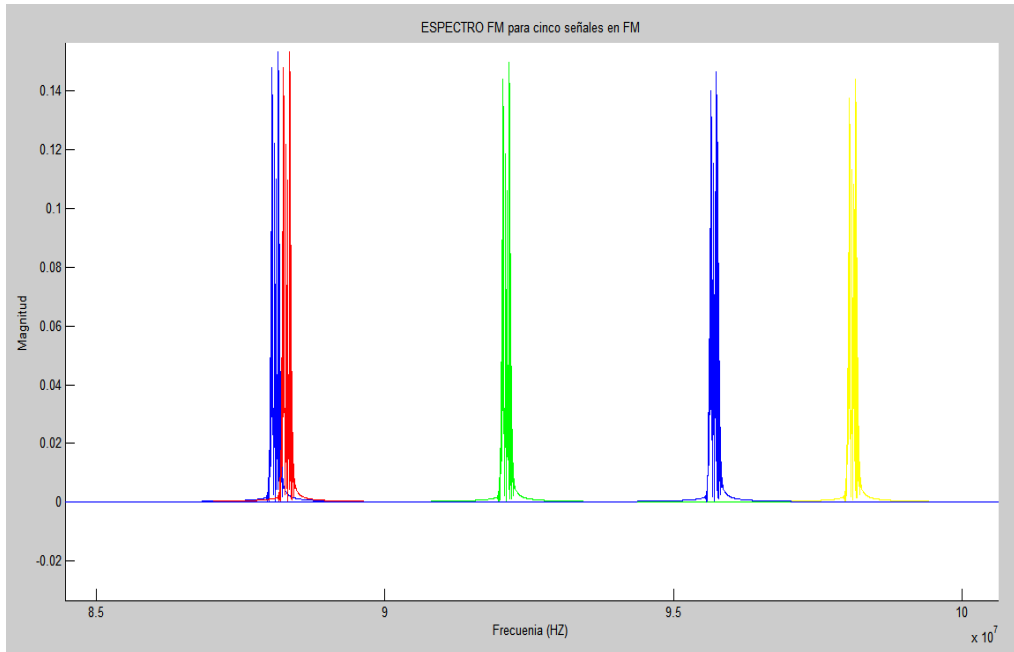
11.3. Anexo 3. Generación del espectro de dos señales ubicadas en 88.1 MHz (Azul) y 88.3 MHz (rojo), mediante el banco de señales FM diseñado.



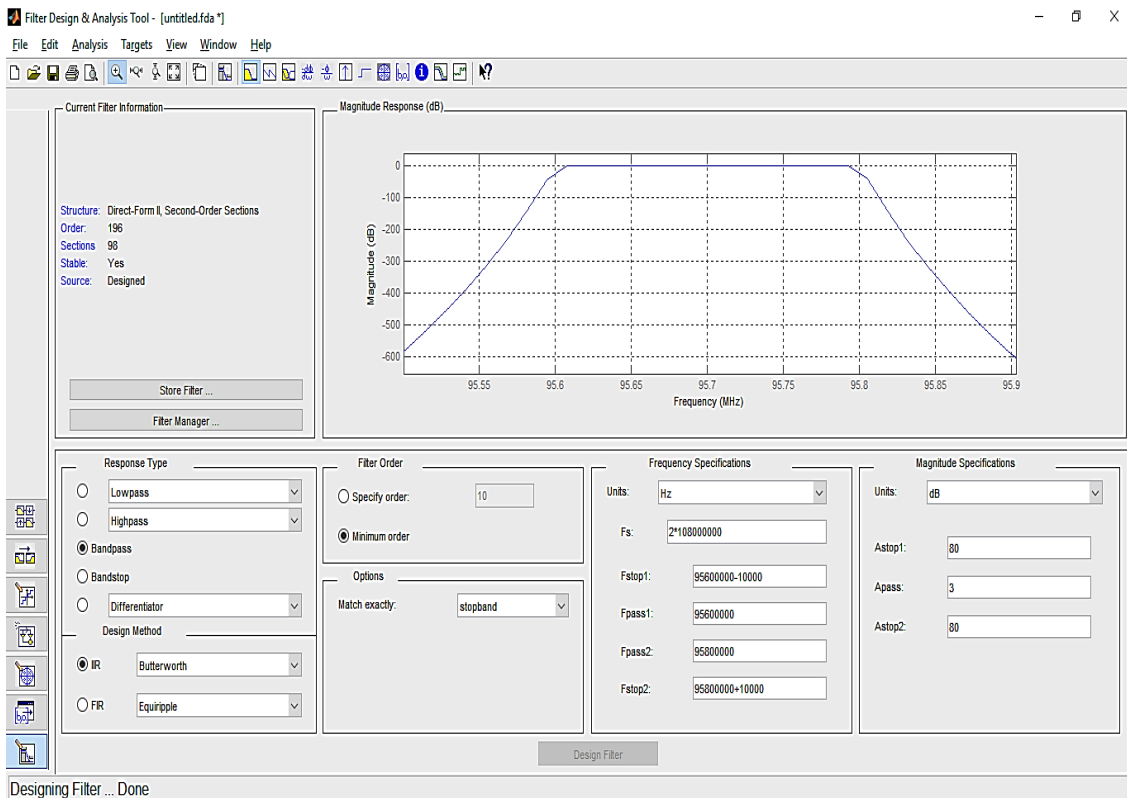
11.4. Anexo 4. Las dos señales del Anexo 3 ampliadas.



11.5. Anexo 5. Cinco señales de prueba, generadas en distintas frecuencias del espectro FM.



11.6. Anexo 6. Interfaz gráfica de la herramienta FDATool de MATLAB.

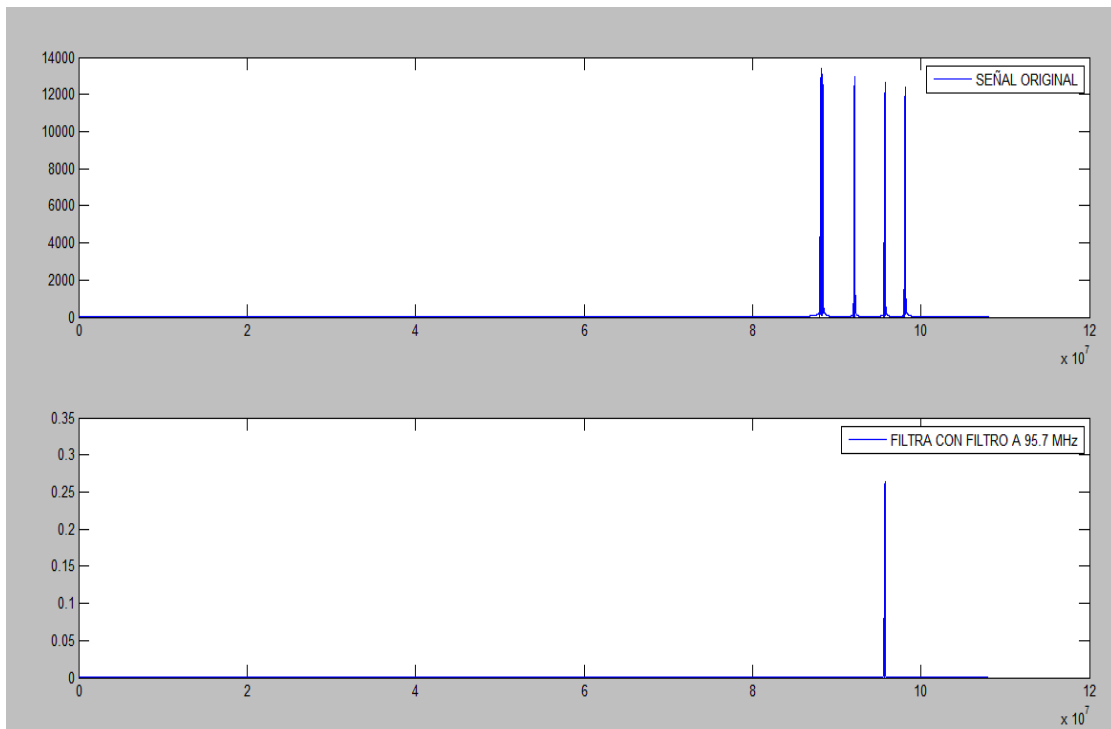


11.7. Anexo 7. Intensidades de Campo mínimo a proteger.

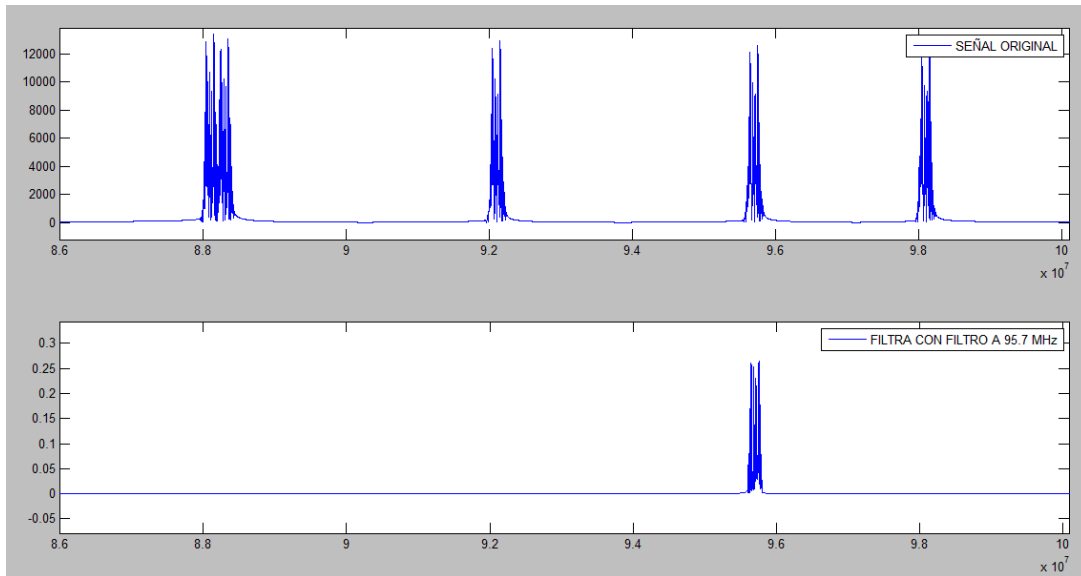
Los valores de intensidad de campo eléctrico, medidos a un nivel de 10 metros sobre el suelo y que serán protegidos en los bordes de las áreas de cobertura son los siguientes:

- Estaciones de potencia normal y locales:
 - En el borde del área de cobertura principal:
Para Monofónicos $\geq 48 \text{ dB}\mu\text{V/m}$
Para Estereofónicos $\geq 54 \text{ dB}\mu\text{V/m}$
 - En el borde del área de cobertura secundaria:
Para Monofónicos $\geq 30 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ y $< 48 \text{ dB}\mu\text{V/m}$.
Para Estereofónicos $\geq 50 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ y $< 54 \text{ dB}\mu\text{V/m}$

11.8. Anexo 8. Filtrado de una señal utilizando el código fuente obtenido utilizando FDATool.



11.9. Anexo 9. Ampliación del Anexo 8 (Filtro centrado en 95.7MHz)



11.10. Anexo 10. Ocupación espectral de 54-108MHz en diferentes sectores de la Provincia de Loja según el estudio realizado en [2].

SubBanda 1					
SUBBANDA: 54 MHz - 108MHz					
Parroquias	Ancho de Banda Utilizado Aprox.	Ancho de Banda Subbanda	Ancho de Banda disponible Aprox.	% Espectro Utilizado	% Espectro Disponible
	MHz				
Loja	24.2	54	29.8	44.81%	55.19%
El Cisne	24	54	30	44.44%	55.56%
Gualiel	2	54	52	3.70%	96.30%
Chantaco	4.4	54	49.6	8.15%	91.85%
Chuquiribamba	23.4	54	30.6	43.33%	56.67%
Taquil	4.8	54	49.2	8.89%	91.11%
San Lucas	0.4	54	53.6	0.74%	99.26%
Santiago	0.4	54	53.6	0.74%	99.26%
Jimbilla	0.2	54	53.8	0.37%	99.63%
Malacatos	19.6	54	34.4	36.30%	63.70%
San Pedro de Vilcabamba	22.2	54	31.8	41.11%	58.89%
Vilcabamba	23.2	54	30.8	42.96%	57.04%
Quinara	1.4	54	52.6	2.59%	97.41%
Yangana	1.4	54	52.6	2.59%	97.41%