

Sistema de Detección Espectral Mediante Densidad Espectral y Correlación
Haciendo Uso De Radio Definido Por Software.



Gina Marcela Roncancio Quintana

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones
Bogotá, Septiembre 2015

Sistema de Detección Espectral Mediante Densidad Espectral y Correlación
Haciendo Uso De Radio Definido Por Software.



Trabajo de grado

Gina Marcela Roncancio Quintana

Directora: Ing. Mónica Espinosa Buitrago

Asesor: Ing. Iván Eduardo Díaz Pardo

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería de Telecomunicaciones
Bogotá, Septiembre de 2015

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
3. OBJETIVO GENERAL.....	8
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4. MARCO TEÓRICO	9
4.1 ESPECTRO RADIOELÉCTRICO	9
4.2 TELECOMUNICACIONES INALAMBRICAS	10
4.3 RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE (SDR)	13
4.3.1 Estructura y Arquitectura de SDR (Radio Definido por Software)	14
4.3.2 Ettus USRP N210 (Universal Software Radio Peripheral)	15
4.3.3 Tarjetas Hijas	16
4.3.3.1 Tarjeta de transmisión:	17
4.3.3.2 Tarjetas de Recepción:	17
4.4 DIVIDENDO DIGITAL	18
4.4.1 Plan desarrollado para la migración de canales de la banda del dividendo digital	19
4.5 MODELO DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA.....	21
4.6 MODELO DE CORRELACIÓN.....	23
4.6.1 Autocorrelación	24
4.6.2 Intercorrelación	25
4.6.3 Coeficientes de Correlación	26
4.7 MODELO FM.....	26
4.8 INTERPOLACIÓN Y DIEZMADO EN FRECUENCIAS	28
4.8.1 Interpolación	28
4.8.2 Diezmado	29
5.1 ANÁLISIS	31
5.1.2 Software Matlab	32
5.2 PRUEBAS PRELIMINARES.....	35
5.2.1 Recepción de señales	36
5.2.2 Transmisión de señales	38
5.2.3 Caracterización de las antenas	39
5.2.4 Densidad Espectral.....	44
5.2.5 Correlación	51
5.2.6 Medición para FM.....	52
5.2.7 Medición para Banda del Dividendo Digital	54
5.2.8 Análisis de Densidad Espectral	58
5.2.9 Análisis de Correlación	62
5.2.9.1 Banda FM.....	63
5.3 DEFINICIÓN DE MODELOS.....	66
5.3.1 Ruido Gaussiano	66
5.3.2 Modelo de Interpolación	67
5.3.2.1 Proceso de Interpolación en la banda FM	67
5.3.2.2 Proceso de Interpolación en la banda del Dividendo Digital	69
5.3.3 Modelo de Diezmado.....	71
5.3.3.1 Diezmado en la banda de FM	71
5.3.3.2 Diezmado en la banda del Dividendo Digital	73

5.3.4	<i>Modelo de Densidad Espectral</i>	74
5.3.5	<i>Modelo de Correlación</i>	77
5.4	APLICACIÓN DE MODELO	79
6.	RESULTADOS	87
7.	CONCLUSIONES	92
	BIBLIOGRAFIA	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Banda del Dividendo Digital	10
Figura 2 Productividad Colombiana	11
Figura 3 Servicios de Telecomunicaciones	12
Figura 4 Misión NASA radio definido por software	13
Figura 5 Diagrama de Bloques Funcionales de SDR	14
Figura 6 Arquitectura ideal de SDR.....	15
Figura 7 Arquitectura USRP N210	16
Figura 8 Tarjeta Hija Basic TX	17
Figura 9 Tarjeta Hija Basic RX.....	18
Figura 10 Distribución de frecuencias de televisión análoga y Dividendo Digital.....	18
Figura 11 Etapas de la migración de tecnología analógica a digital	20
Figura 12 Espectro para servicios de televisión en Colombia	20
Figura 13 Plan de liberación de la Banda del dividendo digital.....	21
Figura 14 Señal Truncada de $x(t)$	22
Figura 15 a) y b) señales en TD y c) Correlograma	24
Figura 16 a y b Señales Senosoidales, c Interrelación.....	26
Figura 17 Interpolación con factor de 2 para una señal sinusoidal	29
Figura 18 Diezmado con factor de 2 para una señal sinusoidal	29
Figura 19 Equipos Diseño del Radio definido por software	30
Figura 20 Metodología del Diseño del Radio definido por software.....	31
Figura 21 Sistema de comunicación del SDR	32
Figura 22 Librerías Simulink de SDRu	33
Figura 23 Modelo de Recepción	33
Figura 24 Modelo de Recepción	34
Figura 25 Recepción de Datos.....	35
Figura 26 Procesamiento de Datos.....	35
Figura 27 Diagrama de bloques del receptor Fm utilizado	36
Figura 28 Componentes del bloque de simulación FM Receiver.....	37
Figura 29 Receptor FM junto con el analizador de espectro	37
Figura 30 Espectro de la frecuencia recibida con el FM Receiver	38
Figura 31 Eficiencia espectral de 88MHz-89MHz.....	38
Figura 32 Señal transmitida en la frecuencia de 88.3MHz.	39
Figura 33 Caracterización Antena VERT400	41
Figura 34 Caracterización Antena VERT900.	42
Figura 35 Caracterización VERT2450.....	43
Figura 36 Caracterización antena UHF azotea Universidad Santo Tomás.....	43
Figura 37 Ubicación de las Antenas Yagui.....	44
Figura 38 Modelo matemático del muestreo	45
Figura 39 Densidad Espectral de una señal sinusoidal	46
Figura 40 Densidad Espectral de una señal cosenosoidal	46
Figura 41 Densidad Espectral de una señal cosenosoidal	47
Figura 42 Densidad Espectral de una señal cuadrada	47
Figura 43 Densidad Espectral de una señal senosoidal.....	48
Figura 44 Funciones de Simulink.....	48
Figura 45 Diseño de modelo en Simulink.....	49
Figura 46 Densidad espectral de una señal cuadrada en Simulink	49

Figura 47 Señal Cuadrada.....	50
Figura 48 Densidad espectral de la señal cuadrada	50
Figura 49 Valores de Correlación cruzada entre una señal sinusoidal y una señal cuadrada	51
Figura 50 Coeficiente de Correlación de una señal sinusoidal y una señal cuadrada	52
Figura 51 Coeficiente de Correlación de dos señales sinusoidales.....	52
Figura 52 Diagrama de Captura de Datos FM	53
Figura 53 Análisis canal 52 (a) Espectro de Frecuencia (b) Análisis de Portadoras	54
Figura 54 Análisis canal 54 (a) Espectro de Frecuencia (b) Análisis de Portadoras	55
Figura 55 Imagen correspondiente al canal de televisión número 52, ubicado en la frecuencia 705.25MHz	55
Figura 56 Proceso de captura de información correspondiente a la banda de dividendo digital	57
Figura 57 Proceso de Densidad Espectral FM.....	58
Figura 58 Densidad Espectral Promedio de la Banda de FM	59
Figura 59 Densidad Espectral Promedio de Banda Completa del Dividendo Digital a 50KHz.....	60
Figura 60 Proceso de captura de datos para los primeros 20 MHz de la banda del dividendo digital.	61
Figura 61 Densidad espectral de los primeros 20 MHz de la banda de dividendo.....	62
Figura 62 Densidad Espectral Emisora 97.9MHz.....	63
Figura 63 Proceso de Correlación	64
Figura 64 Ruido Gaussiano generado	66
Figura 65 Proceso de interpolación.....	67
Figura 66 Respuesta en frecuencia del proceso de interpolación con factor de 2	68
Figura 67 Representación de la señal de FM con un factor de interpolación de 5.....	69
Figura 68 Portadora de información con frecuencia central en 705.25 MHz, perteneciente a la banda del dividendo digital.....	69
Figura 69 Respuesta en frecuencia del proceso de interpolación con frecuencia central de 705.25 MHz	70
Figura 70 Respuesta en frecuencia de la portadora con factor de interpolación de 5	71
Figura 71 Proceso de diezmado	72
Figura 72 Resultado del diezmado a la señal correspondiente a 89.9MHz	73
Figura 73 Resultado del proceso de diezmado en la banda del dividendo digital.....	74
Figura 74 Proceso de Densidad Espectral.....	75
Figura 75 Banda FM Densidad Espectral vs Frecuencia.....	76
Figura 76 Grafica de dividendo digital en frecuencia vs densidad espectral.....	76
Figura 77 Densidad espectral de los primeros 20 MHz de la banda de dividendo.....	77
Figura 78 Proceso de Correlaciones.....	78
Figura 79 Densidad Espectral Promedio de Banda Completa del Dividendo Digital a 50KHz.....	80
Figura 80 Densidad Espectral Promedio de los primero 20MHz de Banda del Dividendo Digital a 10KHz.....	80
Figura 81 Resultado de la variación de la correlación 1 de la banda Completa del dividendo digital.....	84
Figura 82 Resultado de la variación de la correlación 2 de la banda Completa del dividendo digital.....	84
Figura 83 Resultado de la variación de la correlación 3 de la banda Completa del dividendo digital.....	85

Figura 84 Resultado de la variación de la correlación 1 de los primeros 20MHz de la banda del dividendo digital	85
Figura 85 Resultado de la variación de la correlación 2 de los primeros 20MHz de la banda del dividendo digital	86
Figura 86 Resultado de la variación de la entre Ruido Gaussiano vs de Señal la Banda del Dividendo Digital	88
Figura 87 Densidad Espectral Promedio de la Banda del Dividendo Digital a 1Mhz	89
Figura 88 Resultado de la variación de la correlación 1 de la Banda del Dividendo Digital a 1Mhz.....	91
Figura 89 Resultado de la variación de la correlación 2 de la Banda del Dividendo Digital a 1Mhz.....	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico	10
Tabla 2 Características de Equipos	31
Tabla 3 Elementos de Matlab	32
Tabla 4 Características de funcionamiento de la antena Yagui.....	56
Tabla 5 Correlaciones.....	63
Tabla 6 Correlaciones Emisora 97.9MHz.....	65
Tabla 7 Análisis estadístico	66
Tabla 8 Matriz de Correlaciones	79
Tabla 9 Correlaciones.....	81
Tabla 10 Correlaciones Banda Completa del Dividendo Digital a 50KHz.....	82
Tabla 11 Correlaciones de primeros 20MHz de la Banda del Dividendo Digital a 10KHz.	82
Tabla 12 Resultados estadísticos de las correlaciones de la Banda Completa del Dividendo Digital.....	83
Tabla 13 Resultados estadísticos de las correlaciones de los primeros 20MHz de la Banda del Dividendo Digital	83
Tabla 14 Correlaciones Banda Dividendo Digital a 100KHz.....	88
Tabla 15 Resultados estadísticos de las correlaciones entre Ruido Gaussiano vs de Señal la Banda del Dividendo Digital	88
Tabla 16 Correlaciones Ruido Gaussiano vs Señal de la Banda Dividendo Digital a 1MHz	90
Tabla 17 Resultados estadísticos de las correlaciones entre Ruido Gaussiano vs de Señal la Banda del Dividendo Digital a 1MHz	90

INTRODUCCIÓN

En Colombia el uso del espectro radioeléctrico, tiene gran importancia en el ámbito de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), debido al incremento de servicios que han contribuido a la interconexión de la población, haciendo uso de nuevas tecnologías que requieren una cantidad de espectro mucho menor que otras ya utilizadas. El manejo de estos novedosos procesos brindó una reducción en el uso del espectro lo que permitió que un segmento de espectro fuese liberado para la inclusión de nuevos servicios, tal como sucedió con la transición de televisión analógica a digital en donde el segmento que se liberó se denominó “Dividendo Digital, que será de vital importancia en la futura implementación de los servicios móviles de cuarta generación.

Los cambios en la distribución del espectro presentan beneficios en la sociedad, proporcionando un desarrollo tanto económico como cultural, teniendo como aporte la ubicación de las comunicaciones móviles en la banda de dividendo digital, que permiten la extensión de servicios en el país solucionando los problemas de cobertura existentes en algunas áreas y así mismo ofrecen altas velocidades en las comunicaciones inalámbricas que desde ahora están evolucionando a un estándar de comunicación de cuarta generación (4G), con el principal objetivo de consolidar el uso de redes de comunicación de alta velocidad con una gran calidad de servicio.

Teniendo en cuenta la continua evolución tecnológica y el papel que desempeña el espectro electromagnético en las comunicaciones, especialmente inalámbricas como las móviles, se llevó a cabo una detección espectral que permitió el análisis del uso del espectro electromagnético en las bandas de frecuencia reglamentada por el MinTic (Ministerio de Tecnologías de Información y las comunicaciones) por medio de la densidad espectral de potencia y correlación. Este proceso se basó en la utilización de un sistema de radio definido por software que permite la optimización de recursos y la consecución de mejores resultados que favorecen el desarrollo tecnológico de las comunicaciones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TIC) han surgido con el fin de proporcionar a los países avances tecnológicos, sociales y económicos. Colombia es uno de los países que busca su desarrollo por medio de las TIC ampliando su cobertura de servicios tales como internet y telefonía móvil, por ello es necesario la implementación de una infraestructura de comunicaciones inalámbricas que permite la transmisión de estos servicios como se evidencia en el “plan vive digital”. [1]

Por medio del espectro radioeléctrico, que se encuentra fragmentado en bandas de frecuencia se asignan los diferentes tipos de servicios según el ancho de banda que requiere, así cuando se generan nuevas tecnologías o alteraciones de estas, es necesario hacer una redistribución en las bandas de frecuencia. Esto se evidencia en la transición de televisión analógica a digital, debido a que este cambio generará una banda libre de servicios denominada banda del dividendo digital, que presenta oportunidades para tecnologías móviles y sistemas de acceso de banda ancha inalámbricos pues la banda de frecuencias del dividendo tiene buenas condiciones para la propagación de estos.

Los servicios de telefonía móvil presentan un total de 51.594.619 suscriptores a nivel nacional con un aumento del 23% respecto al primer trimestre de 2010 como se describe en el primer boletín trimestral del 2014 presentado por el Min Tic[2], lo que conlleva a un crecimiento en el uso de estos servicios en los últimos años que puede proporcionar interferencias e indisponibilidades para el servicio de los usuarios si no se tiene una distribución adecuada del espectro radioeléctrico.

Debido al incremento de usuarios de telefonía móvil y cambios tecnológicos se proporcionó un modelo que caracterizó el espectro radioeléctrico de la banda del dividendo digital con el fin de identificar los componentes espectrales que hacen parte de este y aquellos que podrían causar interferencias y problemas en el servicio que se le proporcionará a los usuarios futuros de la banda del dividendo digital.

Para el control y manejo de los diferentes servicios prestados en la banda del dividendo digital es necesario que las frecuencias asignadas para esta banda cumplan con la asignación establecida por el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, de esta forma surgió la necesidad de analizar la banda de frecuencias para determinar su densidad espectral y sus correlaciones, identificando los componentes espectrales que hacen parte de la banda de frecuencia del dividendo digital. Lo que llevó a un estudio de detección en el espectro. Es por eso que se analizó la densidad espectral y sus correlaciones en la banda de dividendo digital, basándose en la pregunta problema: ¿Cómo se desarrolla una detección espectral por medio de la densidad espectral de potencia y correlación en la banda del dividendo digital utilizando radio definido por software?

2. JUSTIFICACIÓN Y PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

Las comunicaciones móviles han tenido un gran impacto en la sociedad, generando un desarrollo, para cumplir con las expectativas de los usuarios que utilizan este servicio, en los últimos años se ha implementado un sistema móvil mejorado denominado sistema de cuarta generación con el fin de aumentar la velocidad de datos, la cantidad de servicios y mejorar la experiencia de los usuarios.[3]

Con la liberación de la banda de frecuencias del dividendo digital se pretende dar oportunidad a nuevas tecnologías como 4G, que utilizarán este recurso por su gran propagación, dando beneficios a sus usuarios como el aumento de cobertura y altas velocidades en el servicio de datos.[4] Para que este servicio pueda garantizar el cumplimiento de sus fines es necesario prevenir interferencias e irregularidades que puedan causar problemas en el servicio, de esta forma los servicios deberán encontrarse ajustados a las normativas establecidas por el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en el país, adecuándose a las frecuencias que fueron asignadas en la subasta para el uso del espectro de la banda del dividendo[5], por ellos fue de gran importancia caracterizar el espectro de la banda del dividendo digital utilizando las técnicas de correlación y densidad espectral debido a que estas técnicas permitieron la identificación de los componentes que hacían parte de la banda y aquellos componentes que no.

3. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el proceso de detección espectral mediante las técnicas de densidad espectral y correlación utilizando sistemas de radio definido por software, con el fin de realizar un panorama espectral para los posibles servicios 4G en la banda del dividendo digital.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Interpretar las técnicas de correlación y densidad espectral para realizar detección espectral.
- Analizar el funcionamiento del sistema de radio definido por software Ettus 210 que serán utilizados en la detección espectral.
- Elaborar la técnica de densidad espectral y correlación en un sistema de radio definido por software que permitan realizar la detección espectral.
- Aplicar las técnicas de densidad espectral y correlación para detección espectral en un sistema de radio definido por software en la banda de frecuencia 88MHz a 108MHz.
- Implementar el proceso de detección espectral para la banda de frecuencia del dividendo digital aplicando densidad espectral y correlación.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

El espectro radioeléctrico es el conjunto de ondas que se encuentran comprendido entre las frecuencias de 3KHz y 300GHz dentro del espectro electromagnético, estas frecuencias son utilizadas para una serie de aplicaciones y servicios de telecomunicaciones, entre los cuales se encuentran servicios de difusión, móviles, fijos, meteorológicos, entre otros, teniendo una gran importancia para el desarrollo económico y social de los países.

Dada la importancia del espectro radioeléctrico la UIT (Unión de Telecomunicaciones), ha reglamentado el uso de este, con el fin de evitar interferencias entre los servicios de telecomunicaciones que tengan diferentes tipos de acceso al espectro. Este reglamento incluye principios básicos de la comercialización, precio, control técnico y gestión del espectro. Además, lo anterior se encuentra en el “Reglamento de Radiocomunicaciones”, ratificado por los miembros de la (UIT) Unión Internacional de Telecomunicaciones. No obstante, cada país gestiona la utilización del espectro, por medio del cuadro nacional de atribución de frecuencias con el fin de establecer los servicios radioeléctricos y sus condiciones técnicas para hacer uso de cada una de las bandas de frecuencia que lo conforman[6][7]

El espectro radioeléctrico se encuentra subdividido por nueve bandas de frecuencias, estas bandas son designadas en orden creciente como se muestra a continuación en la Tabla 1. Este proyecto de investigación hace uso, de la banda UHF (Ultra High Frequency) que se encuentra entre el rango de frecuencias de 300 MHz a 3000 MHz. Dentro de los servicios que se pueden utilizar en esta banda se encuentran la telefonía fija, telefonía móvil, rastreo satelital, radioaficionados, radiodifusión y emisoras radiales. Cabe resaltar que en esta banda se encuentra el rango de frecuencias el dividendo digital donde se prestarán servicios de telefonía móvil como se evidencia en el Gráfico del Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CNABF)[8][7] que se muestra en la Figura 1 y actualmente se encuentra en la transición de televisión a analógica y digital.

Número de la Banda	Símbolos (Inglés)	Gama de Frecuencias	Subdivisión Métrica Correspondiente	Abreviatura Métricas Para las bandas
4	VLF	3 A 30 KHz	Ondas miriamétricas	B.Man
5	LF	30 a 300 KHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300 a 3000 KHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas decimétricas	B.dm
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas	B.cm
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas	B.mm
12		300 a 3000 GHz	Ondas decimilimétricas	
NOTA 1: La << banda N>> (N = Número de la Banda) se extiende de $0.3 \times 10^N \text{ Hz}$ a $3 \times 10^N \text{ Hz}$.				
NOTA 2: Prefijos k=kilo (10^3), M=mega (10^6), G=giga(10^9).				

Tabla 1 Bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico

Fuente: Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia 2014 [8]

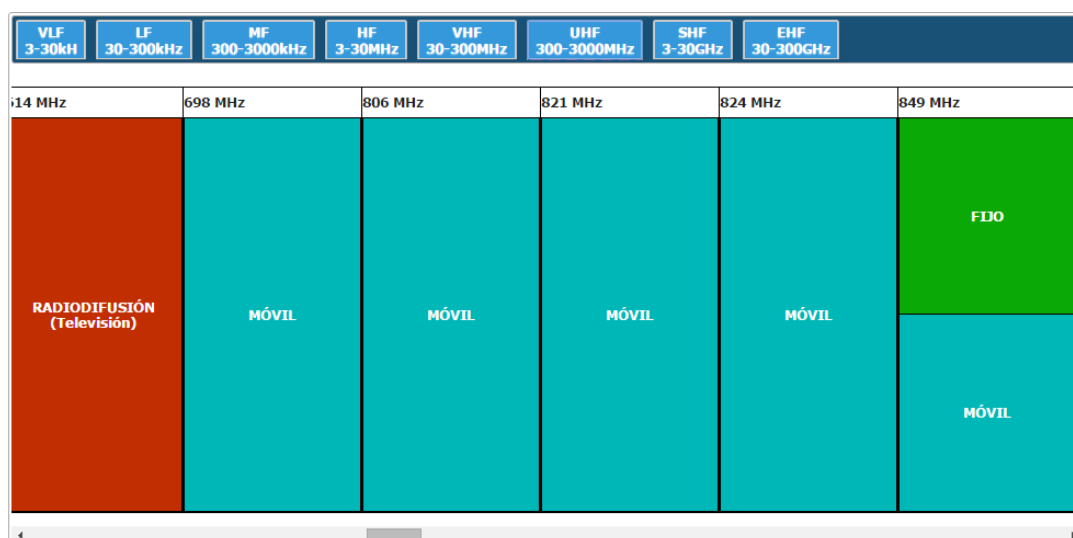


Figura 1 Banda del Dividendo Digital

Fuente: CNABF Gráfico [9]

4.2 TELECOMUNICACIONES INALAMBRICAS

Es preciso considerar que para finales de 2006, ya estaba claro que los procesos de innovación tecnológica sectorial apuntaban hacia el desarrollo de las

comunicaciones personalizadas y ubicuas con convergencia de servicios (voz, video y datos, en cualquier momento y lugar). Esto implicaba la inminente integración de las redes fijas y móviles, y un vertiginoso aumento en el uso de sistemas y dispositivos inalámbricos, particularmente aquellos destinados al acceso de Internet en banda ancha [10]. Que han tenido un aumento de 10% en la penetración de servicios de banda ancha asociado con un incremento de 3,2% en el PIB y de 2,6% de la productividad, de acuerdo con un estudio reciente del Banco Interamericano de Desarrollo. Estos resultados ilustran la importancia de las inversiones en infraestructura de las telecomunicaciones en el crecimiento económico de los países como se puede observar en la Figura 2 a nivel de los servicios de telecomunicaciones en la Figura 3

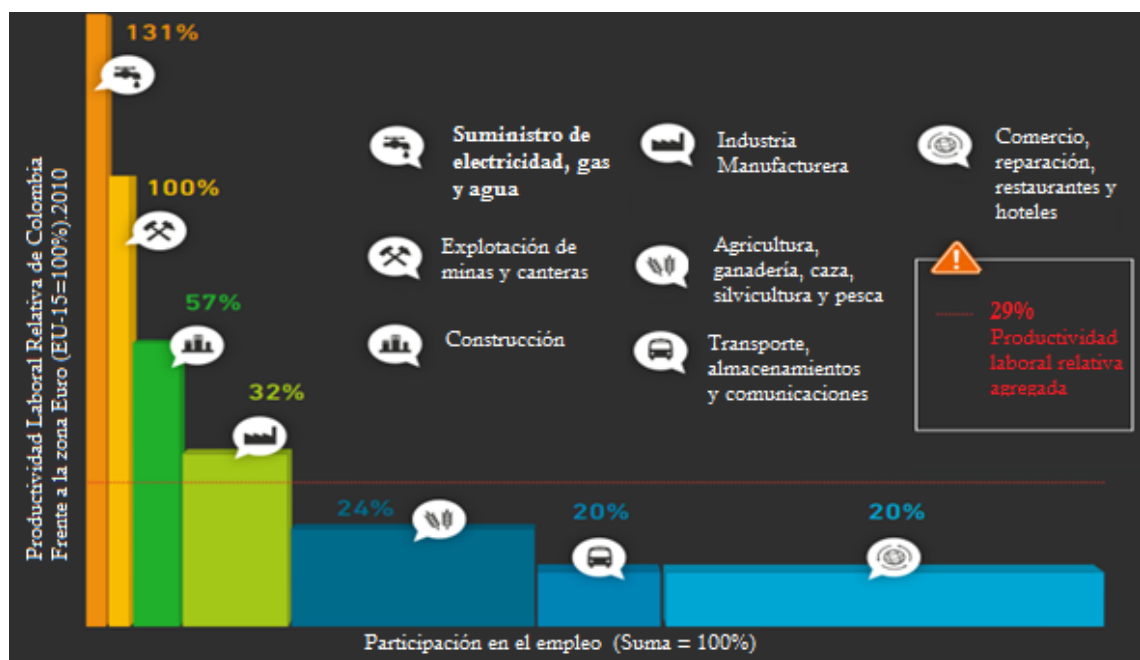


Figura 2 Productividad Colombiana

Fuente: Informe de Competitividad [11]

Toda esta dinámica se acentuaba en la medida que, en el contexto internacional, se ratificaba la versatilidad de las tecnologías inalámbricas de banda ancha como soluciones eficientes y pertinentes para la reducción de la brecha digital, por la rapidez y menor costo que tienen estas soluciones con respecto a redes cableadas.

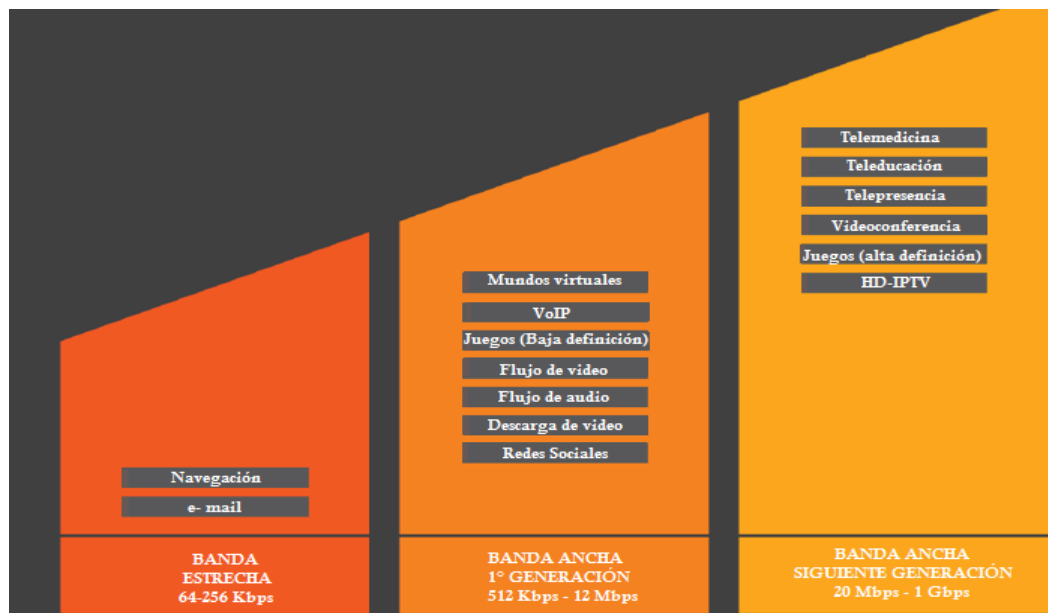


Figura 3 Servicios de Telecomunicaciones

Fuente: Informe de Competitividad [11]

Adicionalmente, se debe considerar que la globalización de las radiocomunicaciones no reconoce fronteras geográficas y que la armonización regional y mundial facilita la introducción de nuevas tecnologías y propicia economías de escala. Siguiendo estos lineamientos, el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010 de Colombia [12], reconocía que las actividades de control y regulación, particularmente en el sector de comunicaciones, contaban con una reglamentación heterogénea y dispersa que desorientaba la inversión y dificultaba el uso y explotación racional, eficiente y equitativa del espectro radioeléctrico (porción del espectro electromagnético utilizado para radio comunicaciones, que comprende actualmente las frecuencias desde 3 KHz a 3.000 GHz; este rango puede ser ampliado en el futuro, según los avances tecnológicos). [13]

Por medio del artículo 75 de la Constitución Política de 1991 en el contexto legal Colombiano se establece que:

“El espectro electromagnético es un bien público inajenable e imprescriptible sujeto a la gestión y control del Estado. Se garantiza la igualdad de oportunidades en el acceso a su uso en los términos que fije la ley. Para garantizar el pluralismo informativo y la competencia, el Estado intervendrá por mandato de la ley para evitar las prácticas monopolísticas en el uso del espectro electromagnético”.

4.3 RADIO DEFINIDO POR SOFTWARE (SDR)

El radio definido por software (SDR) ha sido una revolucionaria tecnología que opera dentro de los sistemas de telecomunicaciones, incluyendo aplicaciones en sistemas militares y comerciales, con un avanzado sistema de procesamiento digital y desarrollo computacional. Útil en la transición de sistemas de radio basados en hardware y software, de manera que, permite la reconfiguración del servicio en operación [14]. Se ha iniciado la explotación científica de estos sistemas, evolucionando la reconfiguración de los servicios críticos permitiendo la flexibilidad al sistema , adaptándolo en los diferentes requerimientos [14].

Además, un radio definido por Software (SDR) es un sistema de radiocomunicaciones configurable en diferentes bandas de frecuencia y cuya aplicabilidad en las comunicaciones actuales se ve altamente demandada. Un SDR está compuesto por diferentes elementos electrónicos que son programados mediante algún software computacional. Dichos elementos pueden ser filtros, moduladores, demoduladores, amplificadores, entre otros [15]. La NASA ha adoptado el radio definido por software ya que permite la adaptación tecnológica en estándares abiertos [15]. Se observa en la Figura 4 una misión desarrollada por la NASA en Spacetelecommunications radio system (STRS), que ha permitido generar la plataforma de gestión y el radio definido por software [14]. Actualmente las investigaciones en el campo de radio están dirigidas a la concepción del sistema de transmisión y la gestión del mismo que permitan la reconfiguración. En las redes de área local inalámbricas se observan propuestas de diseño IEEE 802 [16].

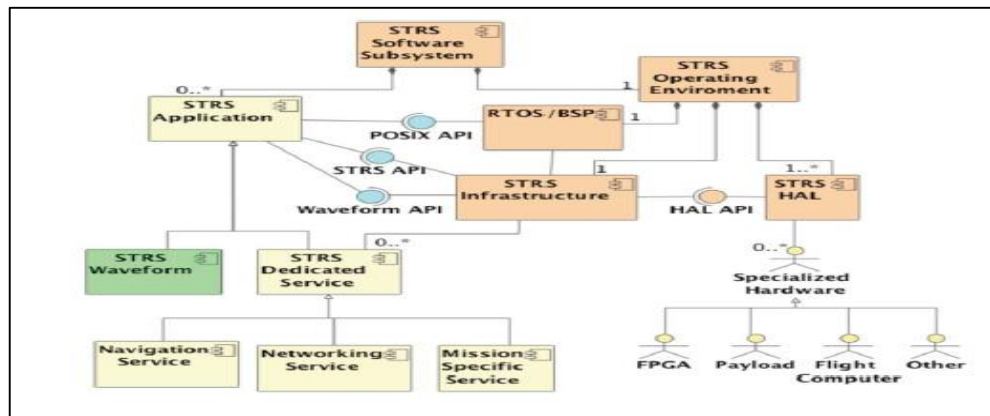


Figura 4 Misión NASA radio definido por software

Fuente: NASA [15]

4.3.1 Estructura y Arquitectura de SDR (Radio Definido por Software)

La estructura de SDR se compone de tres bloques funcionales: sección de RF, sección de IF y sección banda base como se muestra en la Figura 5

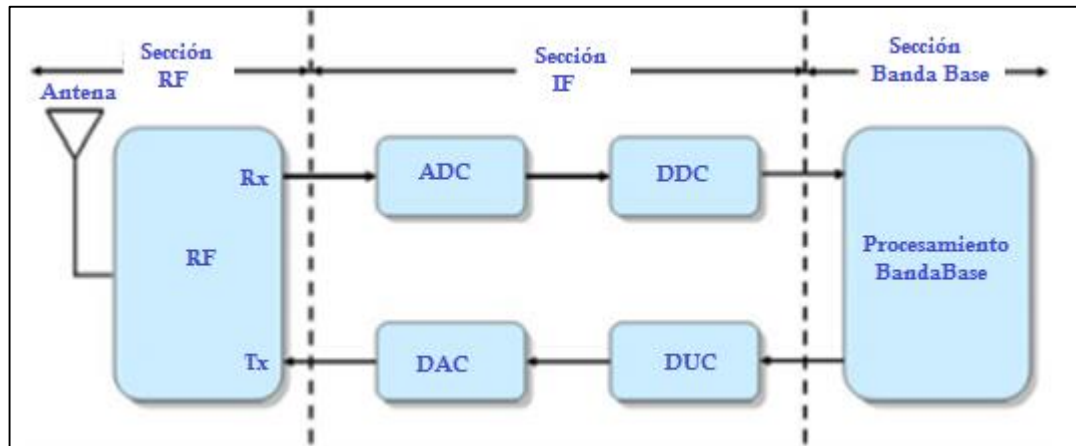


Figura 5 Diagrama de Bloques Funcionales de SDR

Fuente: SDR: La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico [17]

La sección de Radio Frequency (RF) tiene como fin dos procesos, uno para transmisión y otro para recepción. El proceso de recepción consiste en adaptar y transformar las señales de radiofrecuencias a frecuencias intermedias. Mientras que el proceso de transmisión amplifica y modula las señales de IF (Intermediate Frequency) para adecuarlas a la transmisión en el aire.[17][18].Este proceso se observa en los módulos DDC/DUC que se encargan de bajar digitalmente la señal IF a Banda Base o subir de Banda Base a IF según corresponda.

La conversión analógica- digital y digital- analógica se realiza por medio de los módulos ADC/DAC, ubicados también en la sección de IF como se observa en la Figura 5.[18][17]

Y por último esta la sección de Banda Base que como su nombre lo indica se encarga de todo el proceso de Banda Base como Frequency hopping, establecimiento de sesión, ecualización entre otros.[17][18]

La arquitectura de SDR se compone de dos partes esenciales un subsistema analógico y un subsistema digital como lo muestra a continuación la Figura 6.

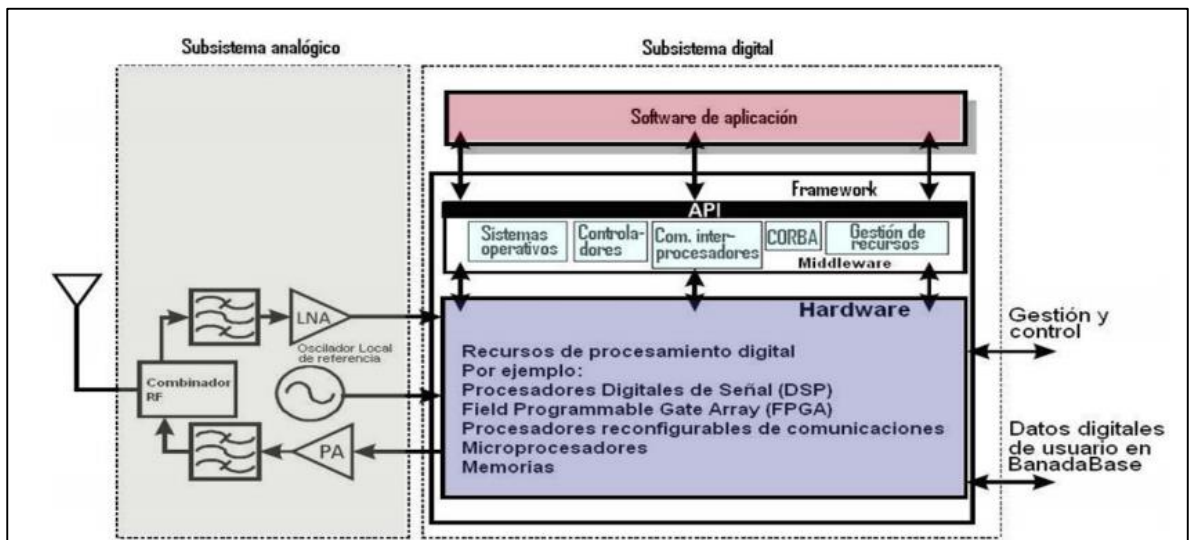


Figura 6 Arquitectura ideal de SDR

Fuente : Implementación y configuración de un Radio definido por Software [18]

El subsistema analógico cuenta con la alimentación de la antena, filtros RF, amplificadores y generadores de frecuencias de referencia entre otros elementos[17][19].

Por otra parte se encuentra el subsistema digital, que se adapta al hardware sobre el cual se encuentra implementado, dentro de sus componentes se encuentran los referentes a los equipos terminales y a los equipos de transmisión e interconexión tales como sistemas operativos, interfaces de programación de aplicaciones, etc.[18]

4.3.2 Ettus USRP N210 (Universal Software Radio Peripheral)

USRP (Universal Software Radio Peripheral, Software Universal de Radio Periférica) es un dispositivo que tiene como propósito permitir que un PC cumpla funciones de plataformas de SDR y los elementos de hardware que conforman el equipo se encuentran diseñados para ser modificados por software. Dentro de sus principales características se encuentran[19][20]:

- 50 MHz de ancho de banda con muestras de 8 bits
- 25 MHz de ancho de banda con muestras de 16 bits
- Conectividad Gigabit Ethernet
- FPGA: Xilinx Spartan XC3SD3400A
- Convertidores Analógico-Digital/Digital-Analógico 14-bits 100 MS/s

El dispositivo USRP N210 cuenta con una interface Gigabit Ethernet que permite conectar a otros dispositivos para el intercambio de datos, un controlador de red y tarjeta madre basada en la FPGA permitiendo la configuración de hardware, un

bloque de interpolación, convertidores ADC y DCA, antenas, tarjetas hijas que realizan los diferentes tratamientos digitales de la señal y un bloque de diezmado. [20] Como se muestra en la Figura 7

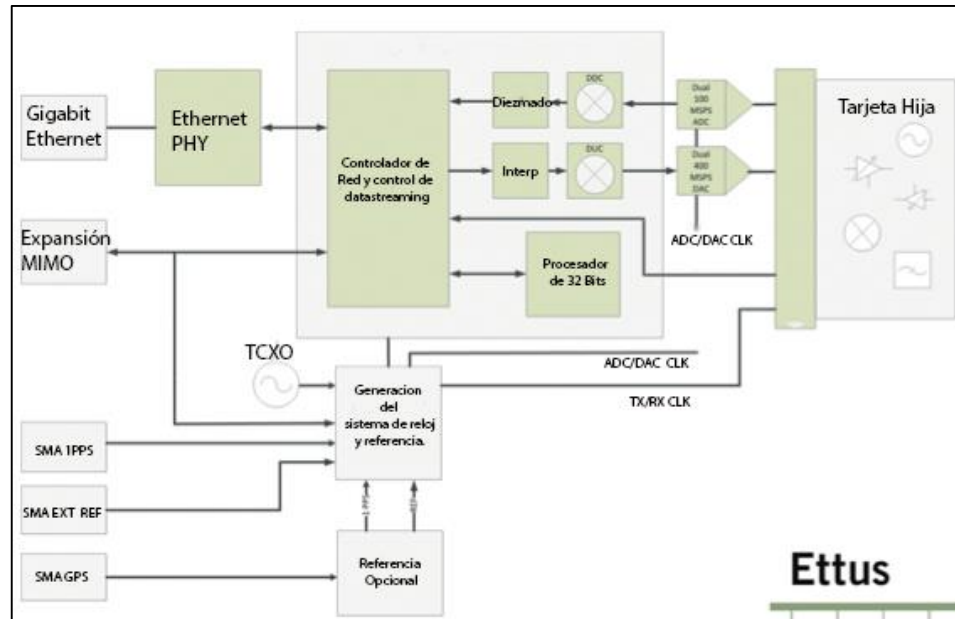


Figura 7 Arquitectura USRP N210

Fuente: Datasheet USRP N210 [21]

4.3.3 Tarjetas Hijas

Existen una variedad de tarjetas hijas que se adaptan a las necesidades del equipo USRP N210, permitiendo variar características como velocidades y ancho de banda, dentro de las cuales se encuentran:

- BasicRX: 1-250 MHz Receptor
- BasicTX: 1-250 MHz Transmisor
- LFRX: DC to 30 MHz Receptor
- LFTX: DC - 30 MHz Transmisor
- WBX: 50 - 2.2 GHz Transceptor
- SBX: 400 – 4400 MHz Transceptor
- RFX900: 750-1050 MHz Transceptor
- RFX1200: 1150-1450 MHz Transceptor
- RFX1800: 1.5-2.1 GHz Transceptor
- RFX2400: 2.3-2.9 GHz Transceptor
- XCVR2450: 2.4-2.5 GHz and 4.9-5.9 GHz dual-band Transceptor

4.3.3.1 Tarjeta de transmisión:

La tarjeta hija de transmisión BasicRx se caracteriza por ser una placa que tiene una capacidad de transmisión de 1 a 250 MHz, esta tarjeta proporciona señales relativamente limpias dentro de su rango operable de frecuencias, las señales muestreadas por el DAC son manipuladas en la FPGA, lo que permite ser sub-muestreadas cuando se quiere obtener una frecuencia de salida mayor al ancho de banda crítico de 100MHz o 200MHz de los DACS, además emplea dos transformadores de banda ancha para que las salidas del conversor digital análogo DAC duales del USPR coincidan a las conexiones a 50-ohm.[22]

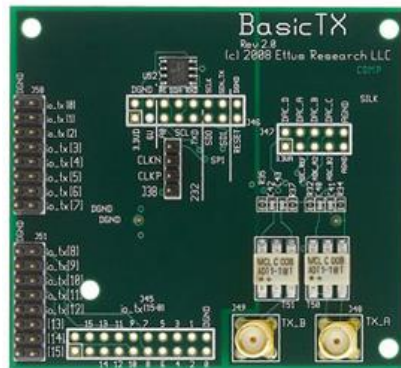


Figura 8 Tarjeta Hija Basic TX

Fuente: products Ettus Research [22]

4.3.3.2 Tarjetas de Recepción:

La tarjeta BasicRX recibe señales en modo real de 1 a 250MHz, este receptor es ideal para aquellas aplicaciones que utilizan los puertos de radiofrecuencias, que provee señales relativamente limpias dentro del rango de frecuencias operable, las frecuencias de muestreo del ADC USPR se encuentran por debajo de 100Mb/s lo que permite recibir frecuencias más altas por medio de métodos de sub-muestreo.[23]



Figura 9 Tarjeta Hija Basic RX

Fuente: Products Ettus Research

4.4 DIVIDENDO DIGITAL

Al analizar las bandas IMT (Telecomunicaciones Móviles Internacionales) en Colombia se observa una denominada Dividendo Digital. Que procede de la evolución de la televisión analógica a digital, debido a que este cambio de tecnología liberó la porción de espectro radioeléctrico otorgado a esta banda.

La Figura 10 describe el reordenamiento del espectro radioeléctrico en Europa luego de la migración de televisión analógica a digital, y la porción de espectro radioeléctrico que se designó para el Dividendo Digital. [24]



Figura 10 Distribución de frecuencias de televisión análoga y Dividendo Digital

Fuente: Gobierno de España [25]

En Colombia, ese rango de frecuencias (698-806MHz)[26] está siendo ocupado por la Televisión analógica, ahora bien con el cambio de televisión analógica a digital se debe realizar una reorganización de asignación de frecuencias para este servicio, y de esta manera hacer un buen uso del espectro radioeléctrico. Lo que conlleva a realizar un plan para la migración de servicios de televisión, en vista de esto, el ministerio de Tecnologías de la información y las comunicaciones está adelantando un plan que permita llevar a cabo este proceso [27]

En aspectos económicos, los gobiernos de la mayoría de países han aumentado la percepción de los servicios de comunicaciones electrónicas inalámbricas, para lograr innovar las tecnologías y así ganar más productividad, crecimiento, además de reducciones en el costo de los servicios a prestar. Con el fin de hacerlos con mayor acceso a la mayor parte de la sociedad y de esta manera poder posicionar su país como un pionero de desarrollo tecnológico y de aprovechamiento de recursos naturales.

En la atribución de las frecuencias[28] para la tecnología móvil 4G; que pretende revolucionar las velocidades de recepción y transmisión de datos que se trabajan con 3G, se da un rango amplio de frecuencias, distribuidas en 13 diferentes Bandas en las que en cada una se establece un rango de frecuencias donde se pretende establecer los diferentes servicios que se prestarán.

4.4.1 Plan desarrollado para la migración de canales de la banda del dividendo digital

El plan desarrollado para la migración de canales de la banda del dividendo digital se encuentra constituido por tres fases , la primera se hace un análisis de la distribución del espectro antes de la transición, la segunda es la etapa de transición donde se comienza con la migración de tecnología análoga a digital y por último se encuentra el apagón analógico donde solo queda la tecnología digital [29] como se muestra en la Figura 11.

En Figura 12 se evidencia la distribución del espectro para los servicios de televisión que encuentran dentro de las bandas VHF y UHF, además señala los 108 MHz que establecen la banda del dividendo digital, y dentro de la cual se encuentran los canales del 52 al 69.[29]

Para desarrollar cada una de estas etapas es necesario tener en cuenta que el espectro debe tener una gestión adecuada para que de esta manera se garantice el servicio de televisión digital terrestre.[30][29]



Figura 11 Etapas de la migración de tecnología analógica a digital

Fuente: XXIV Congreso de Telecomunicaciones, Cartagena de Indias, Octubre 2009[29]

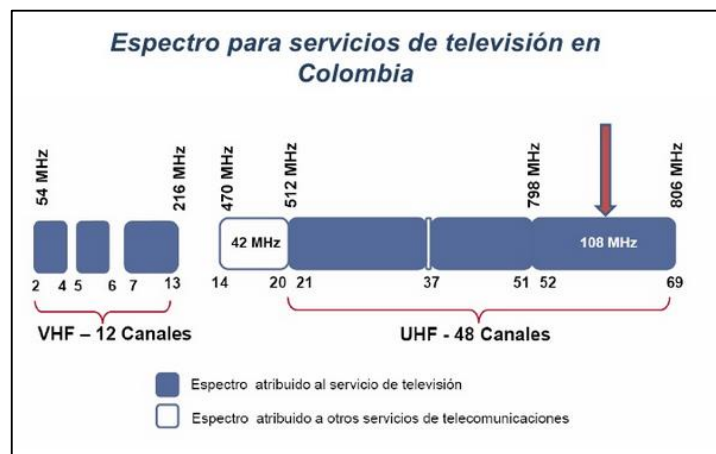


Figura 12 Espectro para servicios de televisión en Colombia

Fuente: XXIV Congreso de Telecomunicaciones, Cartagena de Indias, Octubre 2009[29]

Dentro de los aspectos que se tuvieron en cuenta para la administración del espectro se encontraron:

- La definición de las frecuencias con las cuales podrían operar la televisión digital dentro de la etapa de transición como en la etapa final, utilizando las frecuencias en la parte inferior de la Banda de UHF.
- La reubicación temporal en las frecuencias reservadas para nuevos operadores.
- Liberar para el periodo posterior al apagón analógico los canales del 52 al 69.

En la Figura 13 se muestra el plan de migración de analógico a digital con sus respectivas etapas.[29][30]

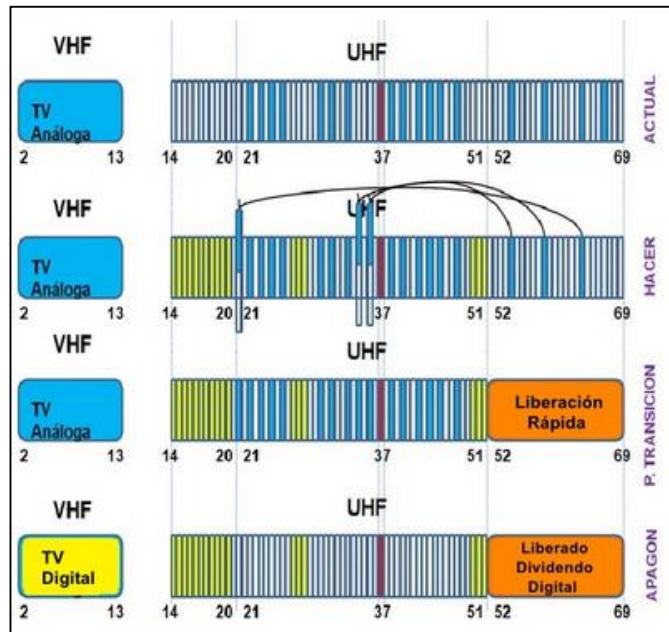


Figura 13 Plan de liberación de la Banda del dividendo digital

Fuente: XXIV Congreso de Telecomunicaciones, Cartagena de Indias, Octubre 2009[29]

4.5 MODELO DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA

La densidad espectral de una señal está clasificada en dos: la densidad espectral de potencia y en la densidad espectral de energía, esta permite analizar la cantidad de energía o de potencia según sea el caso, que tiene la señal para cada frecuencia[31][32]. La densidad espectral está definida por:

$$F\{Rx(\tau)\} = |x(f)|^2 = S_x(f) \quad (1)$$

Donde $R_x(\tau)$ es la función de energía o potencia de la señal

F = Transforma de Fourier

$S_x(f)$ Es la densidad espectral

El espectro de densidad de potencia de una señal se encuentra determinado por $S_x(f)$ y se define partiendo de la premisa de:

$$\langle x^2(t) \rangle \geq \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) df \quad (2)$$

Es decir que su integral debe ser la potencia promedio de $x(t)$, la densidad espectral de potencia $S_x(f)$ representa la distribución de potencia en el dominio de la

frecuencia, debido a que la potencia es una magnitud positiva, la densidad espectral de potencia será una función par y positiva para toda frecuencia [33].

Para conseguir una expresión que relacione $x(t)$ con $S_x(f)$ se debe tener en cuenta un enfoque determinístico conocido como “Criterio de la señal truncada”, donde $x(t)$ es una señal de potencia y $x_T(t)$ es una parte de $x(t)$ que se encuentra dentro del intervalo $(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2})$, como se muestra a continuación:

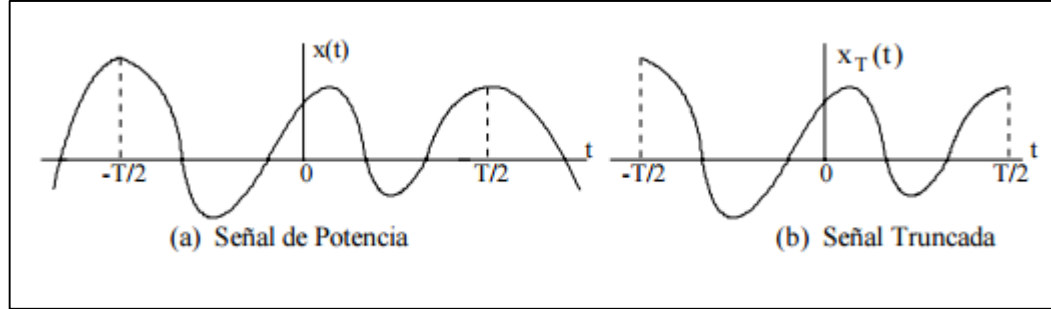


Figura 14 Señal Truncada de $x(t)$

Fuente: Principios de las Comunicaciones [33]

La señal de $x_T(t)$ es la señal truncada de $x(t)$ y si dentro de su intervalo cumple con las condiciones para que exista la Transformada de Fourier, entonces dicha transformada relacionara $x(t)$ con $S_x(f)$.

La potencia promedio de $x(t)$ es de:

$$\langle x^2(t) \rangle \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) x^*(t) dt \quad (3)$$

Como $x_T(t) = x(t)$ en el intervalo $(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2})$, entonces se puede escribir

$$\langle x^2(t) \rangle \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x_T(t) \widehat{x_T(t)} dt \quad (4)$$

Pero $x_T(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_T(f) \exp(j2\pi ft) df$, entonces

$$\langle x^2(t) \rangle \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \widehat{x_T(t)} \left[\int_{-\infty}^{\infty} X_T(f) \exp(j2\pi ft) df \right] dt \quad (5)$$

$$\langle x^2(t) \rangle \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} X_T(f) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \widehat{x_T(t)} \exp(j2\pi ft) dt \right] df \right\} \quad (6)$$

La integral que se encuentra dentro de los corchetes equivale a $\widehat{X_T(f)}$, de donde

$$\langle x^2(t) \rangle \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} X_T(f) \widehat{X_T(f)} df = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(f)|^2}{T} \right] df \quad (7)$$

De esta forma se concluye que[33]:

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X_T(f)|^2}{T} \text{ siempre y cuando exista limite} \quad (8)$$

4.6 MODELO DE CORRELACIÓN

La correlación es la relación matemática que existe entre señales, permite cuantificar la similitud entre estas, basándose en el promedio temporal y la transformada de Fourier.[34][35]

Cuando dos señales tienden a moverse en la misma dirección al mismo tiempo se dice que existe una correlación positiva y cuando tienden a moverse en direcciones opuestas al mismo tiempo se dice que se tiene una correlación negativa.[36]

Para evidenciar la correlación existe un diagrama denominado correlograma, de esta forma si se compara dos señales, entre más parecidas sean formaran una línea recta indicando su alta correlación. En la Figura 15 se observa las señales a y b donde $a = X_1[n]$ y $b = -X_1[n]$ al correlacionarlas se obtiene una señal c que forma una línea recta.

La función de correlación tiene dos áreas de aplicación: la primera es la autocorrelación con la cual se detecta una señal repetitiva sumida en ruido o para la medición de una banda de frecuencia particular de una señal y la segunda se conoce con el nombre de intercorrelación que es utilizada para comparar dos señales con el fin de encontrar similitud entre ellas. [37]

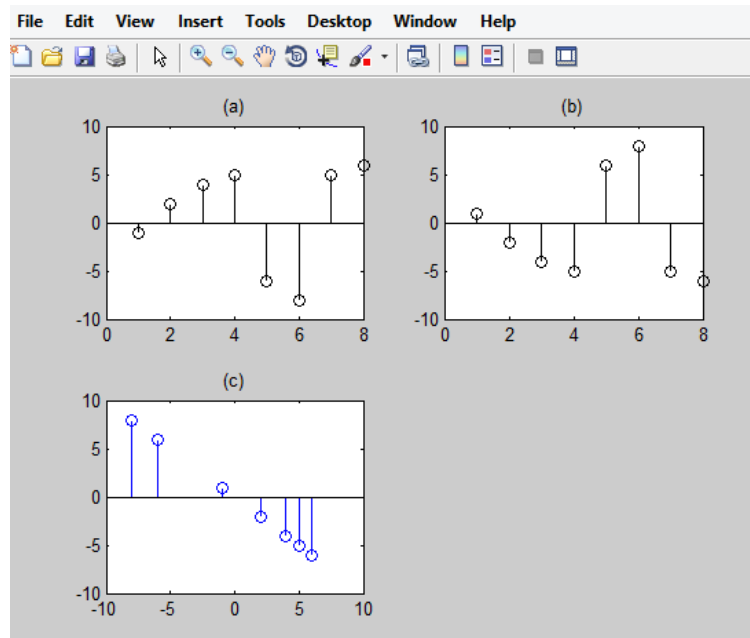


Figura 15 a) y b) señales en TD y c) Correlograma

Fuente: Propia

4.6.1 Autocorrelación

Esta función es implementada en la detección y reconocimiento de señales, y es la correlación de una señal consigo misma, la autocorrelación de una señal real $X(t)$ se define de la forma:[38][35]

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt = \langle x(t)x(t+\tau) \rangle \quad (9)$$

Si $x(t)$ es periódica de periodo T

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau)dt \quad (10)$$

Si $x(t)$ es compleja,

$$R_x(\tau) = \langle x(t)x^*(t+\tau) \rangle = \langle x^*(t)x(t+\tau) \rangle \quad (11)$$

Donde τ es el parámetro de exploración o búsqueda que encuentra componentes de altas y bajas frecuencias.[37]

Para una señal discreta se encuentra representada por la ecuación:

$$R_{xx}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]x[k-n] \text{ para } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (12)$$

4.6.2 Intercorrelación

También llamada “correlación cruzada” o “correlación mutua”, esta función permite la comparación entre señales que son diferentes pero coherentes. Además contiene información respecto a frecuencias comunes de las señales y la diferencia fase de ellas.[35][37]

De esta forma la intercorrelación entre dos señales $x(t)$ e $y(t)$ se define como:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t+\tau)dt = \langle x(t)y(t+\tau) \rangle \quad (13)$$

Como se observa en la premisa anterior existe un grado de semejanza en las señales $x(t)$ e $y(t)$, de esta forma existe un rango τ (tiempo de intercorrelación) que permite una medida cuantitativa de grado de coherencia entre ellas. Cuando las señales tienen de intercorrelación igual a cero se dice que son ortogonales de la siguiente forma:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t+\tau)dt = 0 \text{ Para todo } \tau \quad (14)$$

De esta forma las señales son ortogonales por lo tanto no se correlacionan. Para una señal discreta la intercorrelación se define por la siguiente expresión:

$$R_{xy}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]y[k-n] \text{ para } n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (15)$$

Así, si ambas señales son parecidas los valores serán grandes y positivos, mientras que si son negativos indicará que una señal decrece sobre la otra y si estos valores se acercan a cero indicarán que las señales no tienen parecido[39].

En este caso se tienen dos señales sinusoidales diferentes comparadas con la función de intercorrelación:

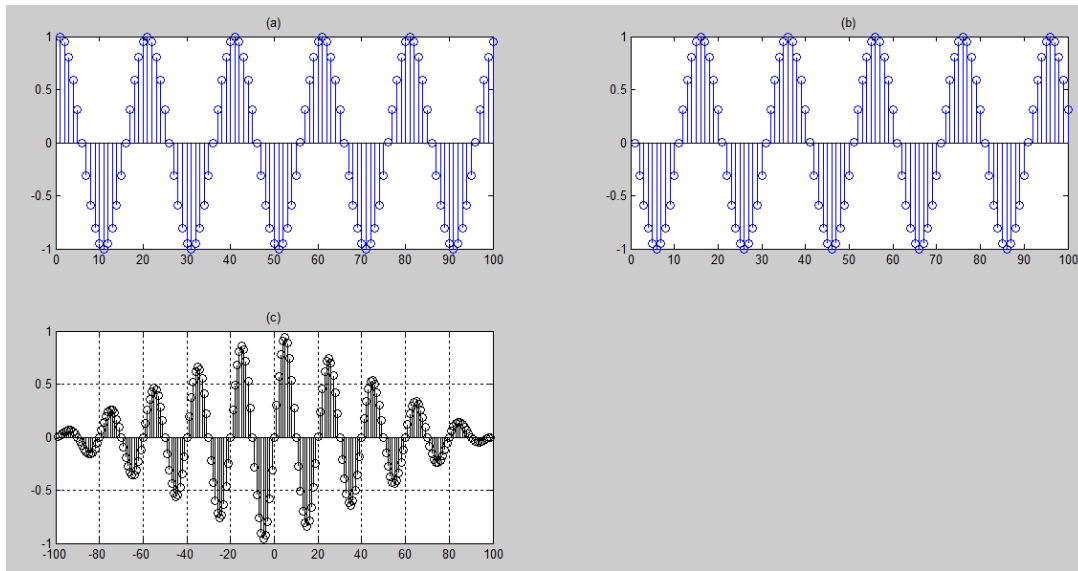


Figura 16 a y b Señales Senosoidales, c Intercorrelación

Fuente: Propia

4.6.3 Coeficientes de Correlación

El coeficiente de correlación se define como la correlación cruzada por la energía de las señales utilizadas, de esta forma se obtendrá un solo valor de correlación para la comparación entre señales que pueden tener diferentes magnitudes:

$$r = \frac{N(\sum_{n=0}^{N-1} xy) - (\sum_{n=0}^{N-1} x)(\sum_{n=0}^{N-1} y)}{\sqrt{[N(\sum_{n=0}^{N-1} x^2) - (\sum_{n=0}^{N-1} x)^2][N(\sum_{n=0}^{N-1} y^2) - (\sum_{n=0}^{N-1} y)^2]}} \quad (16)$$

Así el coeficiente de correlación toma valores en el intervalo [-1,1], donde el valor de -1 indica máxima correlación con señales desfasadas y el valor de 1 indica máxima correlación.

4.7 MODELO FM

La banda de 88 MHz al 108 MHz corresponde a la modulación FM (frecuencia modulada) el modelo matemático de la modulación se describe a continuación.

$$V_{FM} = V_c \cos[2\pi f_c t + \beta \sin 2\pi f_m t] = V_c \cos[\omega_c t + \beta \sin \omega_m t] \quad (17)$$

Expandiendo el coseno de esta ecuación se tiene:

$$V_{FM}(t) = V_c \cos(\omega_c t) \times \cos(\beta \sin \omega_m t) - V_c \sin(\omega_c t) \times \sin(\beta \sin \omega_m t) \quad (18)$$

$$\cos(\beta \sin \omega_m t) = J_0(\beta) + \sum_{2n}^{\infty} 2J_{2n}(\beta) \cos n \omega_m t \quad \text{para } n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (19)$$

$$\sin(\beta \cos \omega_m t) = \sum_{2n-1}^{\infty} 2J_{2n-1}(\beta) \sin n \omega_m t \quad \text{para } n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (20)$$

Donde $J_n(\beta)$ son los coeficientes de Bessel de primer orden con argumento β , correspondiente al Índice de Modulación de FM.

Reemplazando en $V_{FM}(t)$ se tiene:

$$V_{FM}(t) = V_c \cos(\omega_c t) \left[J_0(\beta) + \sum_{2n}^{\infty} 2J_{2n}(\beta) \cos(n \omega_m t) \right] - V_c \sin(\omega_c t) \sum_{2n-1}^{\infty} 2J_{2n-1}(\beta) \sin(n \omega_m t) \quad (21)$$

Teniendo,

$$\cos a \times \cos b = \frac{1}{2} \cos(a - b) + \frac{1}{2} \cos(a + b) \quad (22)$$

$$\sin a \times \sin b = \frac{1}{2} \cos(a - b) - \frac{1}{2} \cos(a + b) \quad (23)$$

Desarrollando,

$$V_{FM}(t) = V_c J_0(\beta) \cos(\omega_c t) + \sum_{2n}^{\infty} J_{2n}(\beta) \cos(\omega_c t) + \cos(n \omega_m t) + \sum_{2n-1}^{\infty} V_c J_{2n-1}(\beta) \cos(\omega_c - (2n-1)\omega_m)t - V_c J_{2n-1}(\beta) \cos(\omega_c + (2n-1)\omega_m)t \quad (24)$$

Desarrollando la Sumatoria en algunos Términos se tiene:

$$\begin{aligned} V_{FM}(t) = & V_c J_0(\beta) \cos(\omega_c t) + V_c J_2(\beta) \cos(\omega_c - 2\omega_m)t + V_c \cos(\omega_c + 2\omega_m)t + \\ & V_c J_4(\beta) \cos(\omega_c - 4\omega_m)t + V_c J_4(\beta) \cos(\omega_c + 4\omega_m)t + \dots \\ & - V_c J_1(\beta) \cos(\omega_c - \omega_m)t - V_c J_1(\beta) \cos(\omega_c + \omega_m)t + V_c J_3(\beta) \cos(\omega_c - 3\omega_m)t \\ & V_c J_3(\beta) \cos(\omega_c + 3\omega_m)t - \dots \end{aligned} \quad (25)$$

Organizando:

$$\begin{aligned}
 V_{FM}(t) = & V_c J_0(\beta) \cos(\omega_c t) + V_c J_1(\beta) \cos(\omega_c + \omega_m)t + V_c J_2(\beta) \cos(\omega_c + 2\omega_m)t \\
 & + V_c J_3(\beta) \cos(\omega_c + 3\omega_m)t + \dots - V_c J_1(\beta) \cos(\omega_c - \omega_m)t - (-1)V_c J_2(\beta) \cos(\omega_c - 2\omega_m)t \\
 & - V_c J_3(\beta) \cos(\omega_c - 3\omega_m)t - (-1)V_c J_4(\beta) \cos(\omega_c - 4\omega_m)t + \dots
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Obteniendo finalmente una ecuación general para FM

$$V_{FM}(t) = V_c J_0(\beta) \cos \omega_c t + \sum_{n=1}^{\infty} V_c J_n(\beta) \cos(\omega_c + n\omega_m)t + (-1)^n \sum_{n=1}^{\infty} V_c J_n(\beta) \cos(\omega_c - n\omega_m)t
 \tag{27}$$

4.8 INTERPOLACIÓN Y DIEZMADO EN FRECUENCIAS

La interpolación y diezmado en frecuencia son dos procesos que se encargan de realizar modificaciones en la frecuencia de muestreo de la señal, con el fin de adaptar la señal al sistema de procesamiento digital de la señal; básicamente la interpolación aumenta esta frecuencia de muestreo por un factor entero, mientras que el diezmado disminuye a razón de un factor entero. [40]

4.8.1 Interpolación

Como se mencionó anterior mente la interpolación es el proceso mediante el cual se puede aumentar la frecuencia de muestreo, para que de esta forma la señal pueda obtener un número determinado de muestras, el factor de interpolación L, se encargara de insertar L-1 muestras en medio de cada una de las muestras de la señal inicial.

Existen varios tipos de interpolación pero una de los más conocidos es el método de interpolación lineal, que se encarga de encontrar el punto medio entre dos puntos, para dar un valor a la muestra agregada. [40] A continuación en la Figura 17 se evidencia el proceso de interpolación para una señal sinusoidal con un factor de 2.

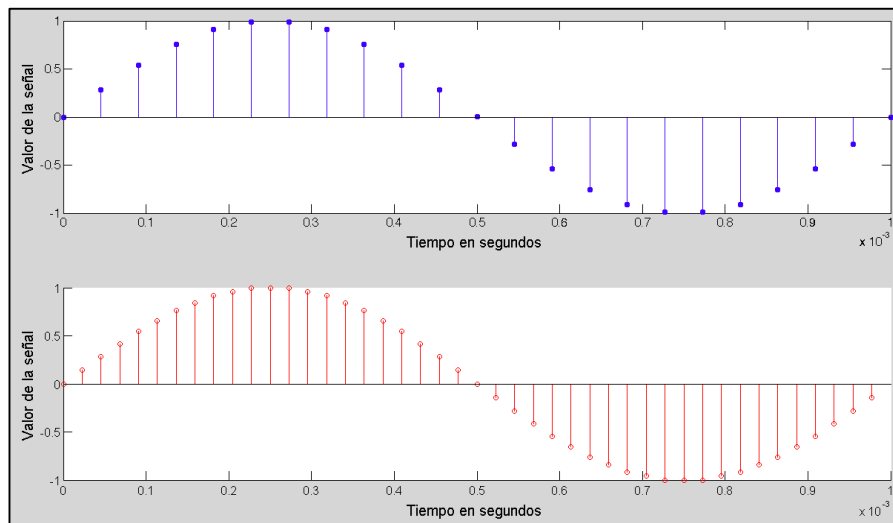


Figura 17 Interpolación con factor de 2 para una señal sinusoidal

Fuente: Propia

4.8.2 Diezmado

Por el contrario el proceso de diezmado lo que hace es disminuir la frecuencia de muestreo de la señal, al igual que la interpolación requiere de un factor M el cual va desechando $M-1$ muestras intermedias. [40]

A continuación se muestra un ejemplo de diezmado con una factor de 2 donde se evidencia la disminución del número de muestras.

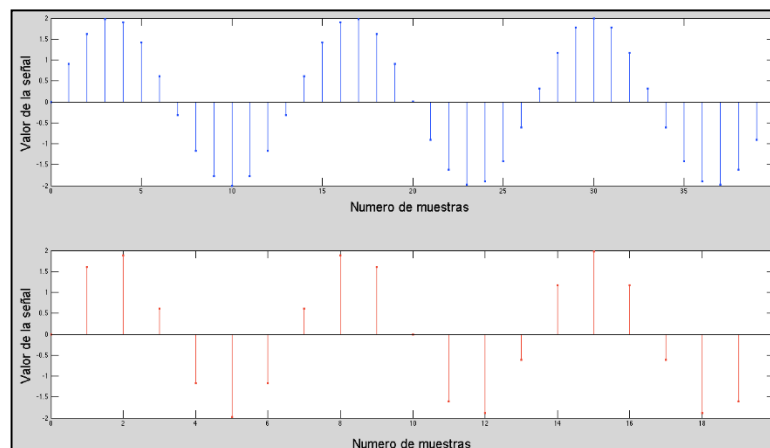


Figura 18 Diezmado con factor de 2 para una señal sinusoidal

Fuente: Propia

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Los sistemas de Universal Software Radio Peripheral (USRP) son una familia de dispositivos fabricados por ETTUS Research [41], según la arquitectura de software utilizando MATLAB [42] y GNU Radio[34] son los dispositivos que serán utilizados y se observan en la Figura 19.



Figura 19 Equipos Diseño del Radio definido por software

Fuente: Propia

La descripción de los equipos de cómputo utilizados es un Procesador Xeon 3040 Dual-Core 1.86GHz, 2 GB de Memoria RAM, 80 GB de Disco Duro 1066 MHz bus speed. En la Figura 20 muestra un resumen de los pasos que comprenden la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto de la investigación. Esta consiste en una base cuantitativa porque pretende aumentar la eficiencia de un sistema determinístico, mediante el uso de distintas estrategias y mediciones realizadas a un sistema. En esta se pueden observar las distintas fases que comprenden el proyecto y las fuentes a partir de las que serán ejecutadas.

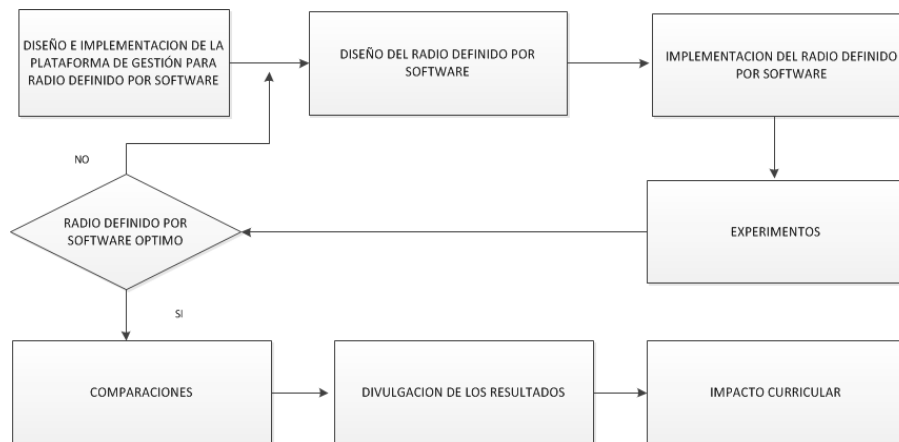


Figura 20 Metodología del Diseño del Radio definido por software

Fuente: Propia

5.1 ANÁLISIS

En la fase de análisis se identificó y analizó las características de cada uno de los equipos y herramientas utilizados dentro del desarrollo del proyecto, se analizó los diferentes requerimientos que se tuvieron en cuenta tanto para el software (Plataforma Matlab) como para el hardware (PC, Dispositivo RDS USRP N210) para la implementación y desarrollo satisfactorio del proyecto.

5.1.1 Equipos

A continuación se hace una breve descripción de las características más relevantes que hacen parte de los equipos utilizados para el desarrollo del proyecto:

Equipo	Características
<i>USRP N210</i>	Maneja un rango de frecuencias DC hasta de 6GHz.
	Es compatible con Linux, Windows y Mac.
	Capacidad MIMO.
	Utiliza una Spartan 3 ^a -DSP 3400 FPGA.
<i>PC Thermaltake</i>	Procesador Xeon 3040 Dual-Core 1.86GHz
	2 GB de Memoria RAM

Tabla 2 Características de Equipos

5.1.2 Software Matlab

Debido a que la primera fase consistió en el diseño e implementación de una plataforma de gestión para radio definido por software, se identificó los principales elementos dentro del software Matlab requeridos para la adaptación de los equipos de USRP N210 dentro de los cuales se encuentran:

Elementos de Matlab
Software de simulación Matlab edición 2013b.
Caja de herramientas del sistema de comunicaciones- Communications System ToolBox.
DSP System ToolBox - Herramientas del sistema de procesamiento digital de señales.
Herramientas de procesamiento de señal – Signal Processing Toolbox
Simulink.

Tabla 3 Elementos de Matlab

La plataforma de gestión del radio definido se desarrolló utilizando simulink en su fase inicial y luego el editor de MATLAB.

La plataforma de comunicación del SDR es realizada por medio de la interface Ethernet a 100Mbps que permite adquirir datos en esta tasa de muestreo, a continuación se evidencia en la Figura 21 el sistema de comunicación implementado por el SDR.

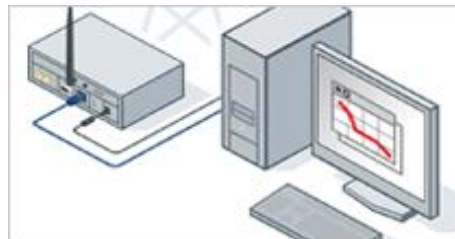


Figura 21 Sistema de comunicación del SDR

Fuente: <http://www.mathworks.com/hardware-support/usrp.html?refresh=true>[43]

Se realizó la instalación del dispositivo Ettus en MATLAB versión 2014 con sus respectivas librerías como se observa en la Figura 22.

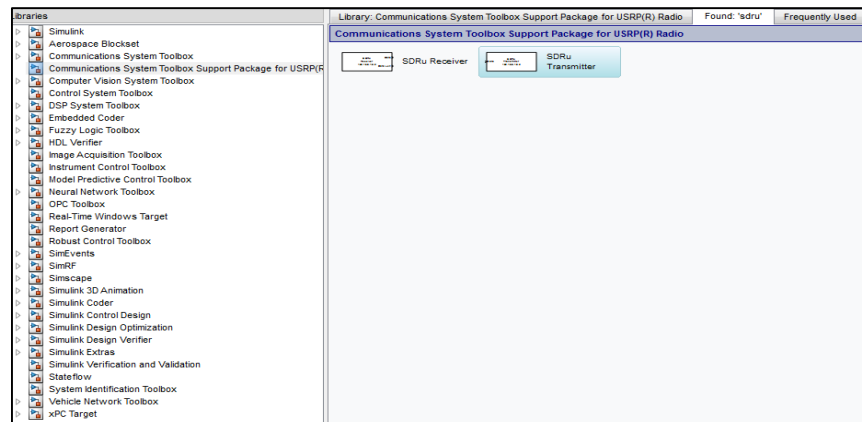


Figura 22 Librerías Simulink de SDRu

Fuente: Propia

Además se comprobó desde la barra de comandos de MATLAB que el dispositivo se encuentra conectado por medio del proceso evidenciado en la Figura 23.

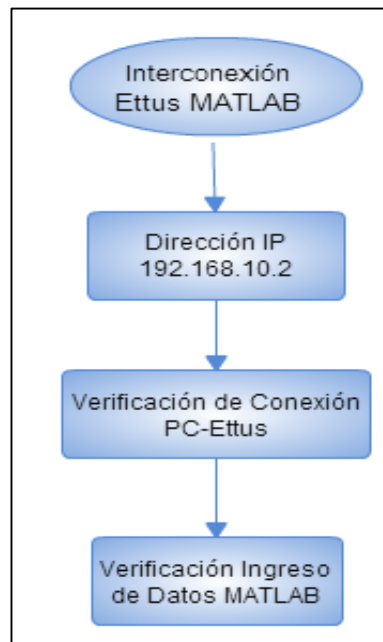


Figura 23 Modelo de Recepción

Fuente: Propia

Una vez comprobado el funcionamiento del dispositivo se utilizó el modelo de recepción, puesto que las señales transmitidas son establecidas en el ERE. Como se observa en la Figura 24.

Source Block Parameters: SDRu Receiver

SDRu Receiver
Receive data from the Universal Software Radio Peripheral (USRP).

Network
USRP IP address: 192.168.10.2

Control

	Source	Desired Value	Device Value
Center frequency (Hz):	Dialog	2.45e9	2.25e+09
LO offset (Hz):	Dialog	0	-5e+07
Gain (dB):	Dialog	32	32
Decimation:	Dialog	512	512

Outputs
☐ Enable overrun output port
 Sample time: 1
 Output data type: int16
 Frame length: 362

Buffering
☐ Enable burst mode

Hardware

```

Mboard 0: N210r4
RX Subdev: WBXv3 RX+GDB
TX Subdev: WBXv3 TX+GDB

Minimum center frequency: 28.75 MHz
Maximum center frequency: 2.24 GHz
Minimum gain: 0 dB
  
```

OK Cancel Help Apply

Figura 24 Modelo de Recepción

Fuente: Propia

Luego se definieron los modelos iniciales para la captura de datos como se observa en la Figura 25 y el procesamiento de los datos en la Figura 26.

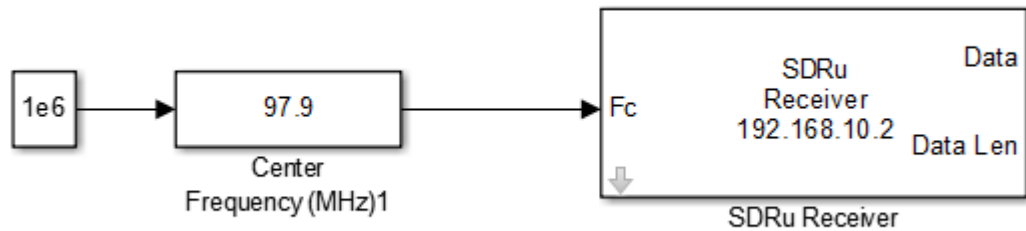


Figura 25 Recepción de Datos

Fuente: propia

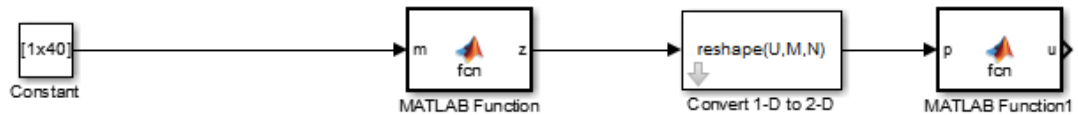


Figura 26 Procesamiento de Datos

Fuente: propia

En esta etapa se analizó en el editor de texto, el trabajo de la recepción de datos como se observa en el programa:

```
hSDRu= comm.SDRuReceiver('192.168.10.2', ...
'CenterFrequency',frecuencia, ...
'Gain',30, ...
'FrameLength',1000, ...
'SampleRate',1/(100e6/500), ...
'DecimationFactor',500);
```

De esta manera se verificó el funcionamiento del dispositivo de SDR y se obtuvo los parámetros adecuados para la captura de datos.

5.2 PRUEBAS PRELIMINARES

En esta fase se realizó en primera instancia la transmisión y recepción por medio de los dispositivos de SDR, se caracterizó las antenas utilizadas dentro del proyecto y por último se realizó el diseño de los modelos de densidad espectral y correlación.

5.2.1 Recepción de señales

Para la verificación del funcionamiento del USRP se realizó una prueba que consistió en un receptor FM (Frecuencia Modulada), implementado por medio del software Matlab y las librerías de simulink de USRP.

El esquema del receptor se muestra a continuación en la Figura 27, con sus respectivas componentes.

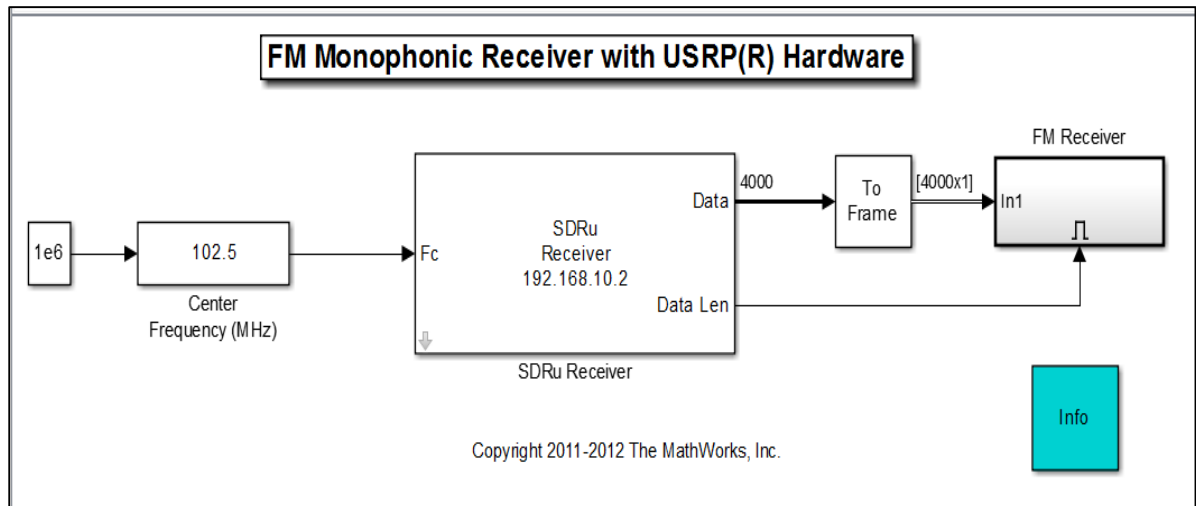


Figura 27 Diagrama de bloques del receptor Fm utilizado

Fuente: Propia

El bloque de SDRu Receiver corresponde al elemento que sería utilizado como soporte para la conexión entre simulink y el dispositivo USRP N210, donde se tendría la comunicación para el correcto paso de la información hacia el receptor FM. Para el dispositivo anteriormente nombrado fue necesario integrarle una antena radio frecuencia en uno de sus puertos para llevar a cabo la recepción de la banda de frecuencia.

Dentro de la caja FM Receiver ubicada al final del esquema se encuentran algunos componentes de vital importancia para la recepción, los cuales se ilustran en la

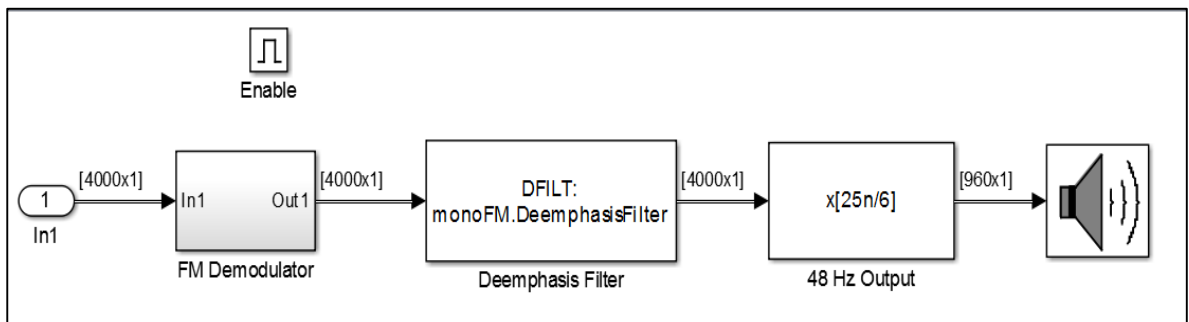


Figura 28 Componentes del bloque de simulación FM Receiver

Fuente: Propia

Dentro de este bloque se encuentra un componente importante denominado Deemphasis Filter, el cual se encarga de realizar una amplificación de la señal y un filtrado en el que se eliminan, las componentes de ruido que se hayan podido generar durante el proceso de recepción. Existen otros elementos dentro de este bloque que contribuyen al proceso con diferentes funciones como demodulación y digitalización de la señal recibida.

Para visualizar el comportamiento espectral fue necesario implementar dentro del diagrama del FM Receiver un analizador de espectro como se evidencia en la Figura 29 en el cual se observa la señal de banda base es decir la información, su repuesta en frecuencia se muestra en la Figura 30. Comprobando el funcionamiento de los dispositivos USRP Ettus Research de la Universidad.

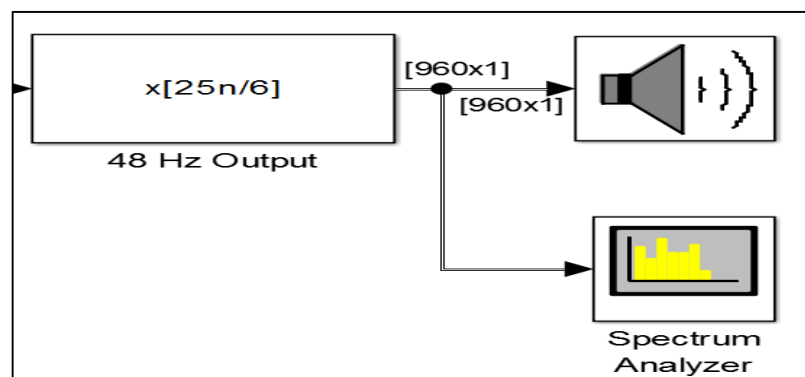


Figura 29 Receptor FM junto con el analizador de espectro

Fuente: Propia

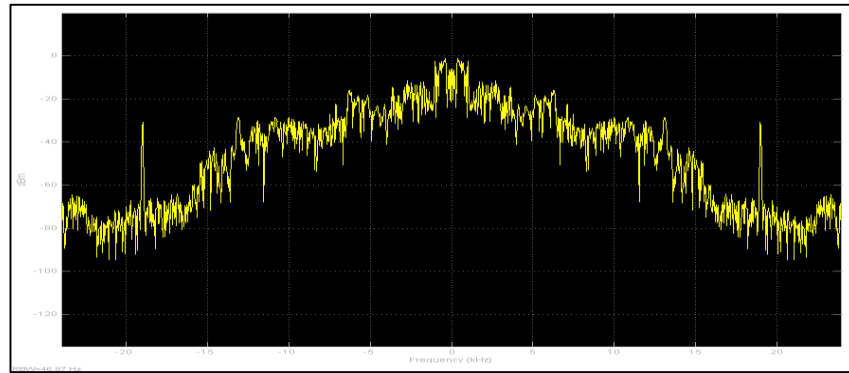


Figura 30 Espectro de la frecuencia recibida con el FM Receiver

Fuente: Propia

5.2.2 Transmisión de señales

Por medio de GNU RADIO se transmitió una señal sinusoidal compleja, utilizando los equipos de SDR con el fin de verificar el funcionamiento de las antenas y tarjetas de transmisión. En primer lugar se realizó un análisis de los componentes espectrales de la banda y se pudo observar que en un pequeño rango de frecuencias (88MHz-89MHz) no presentaba un alto nivel de densidad espectral, por lo cual se procedió a enviar una señal mediante el dispositivo de SDR USRP N210.

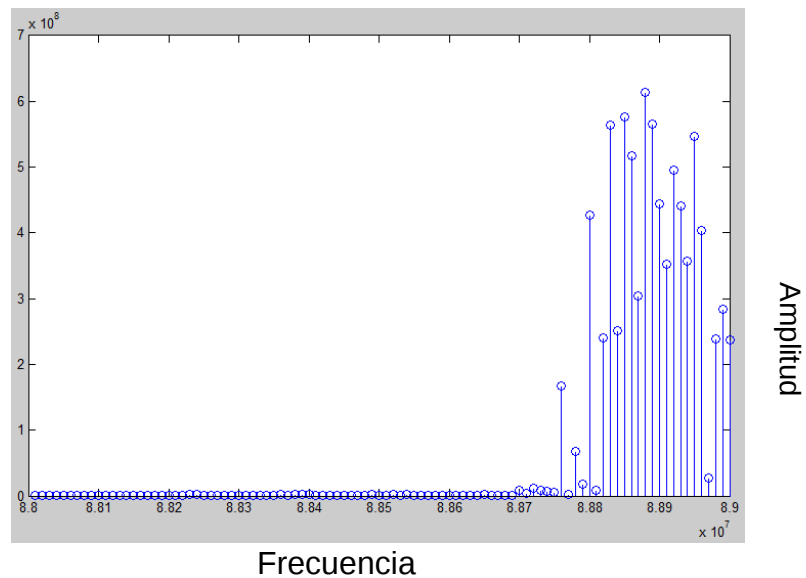


Figura 31 Eficiencia espectral de 88MHz-89MHz

Fuente: Propia

La captura de datos de 1 MHz empezando en 88MHz, arrojó pocas componentes, lo que permitió llevar a cabo la transmisión del tono complejo en una frecuencia perteneciente al intervalo entre 88MHz y 89MHz de la siguiente manera.

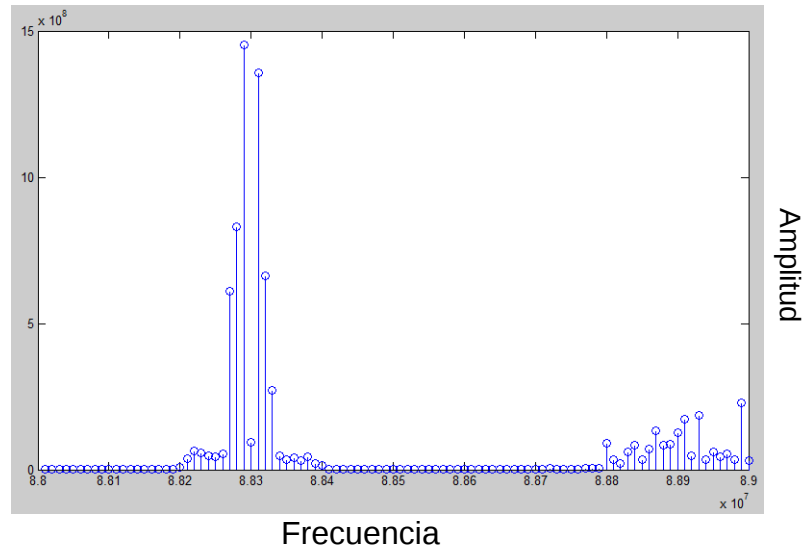


Figura 32 Señal transmitida en la frecuencia de 88.3MHz.

Fuente: Propia

Como se observó en la Figura 32 la señal en la frecuencia de 88.3MHz es transmitida exitosamente permitiendo verificar el funcionamiento de los dispositivos de transmisión.

5.2.3 Caracterización de las antenas

En radiofrecuencia e ingeniería de microondas, el osciloscopio es utilizado para visualizar señales en el dominio del tiempo, mientras que el analizador de redes permite examinar señales en el dominio de la frecuencia. Para realizar mediciones en una antena, el instrumento más utilizado es un Analizador de redes (NA), que es básicamente la combinación entre un transmisor y un receptor. Normalmente este instrumento tiene 2 puertos por los cuales, una señal puede ser generada o recibida de forma indistinta. La función principal de este instrumento es medir la matriz de dispersión o parámetros S de una red, además es posible medir las pérdidas de retorno de un dispositivo de microondas, lo que permite establecer las características de transmisión de una red. Generalmente estas medición se realizan en un laboratorio en cámaras de libre eco y de cualquier interferencia electromagnética (Cámaras anecoicas), aunque existen ocasiones en la que estas

pruebas se realizan a campo abierto ya que las cámaras tienen un costo muy elevado.

Existen principalmente dos tipos de analizadores de redes:

Analizador de redes escalares (SNA): realiza mediciones de la amplitud de los parámetros de una red, como el VSWR, ganancia, pérdidas de inserción y pérdidas de retorno.

Analizador de Redes de Vectores (VNA): realiza mediciones de fase y amplitud de los parámetros de una red. El VNA es un instrumento que opera en el dominio de la frecuencia, se puede obtener la señal en el dominio del tiempo aplicando la transformada de Fourier.

En el caso del proyecto se utilizó un VNA Rode&Schwarz con referencia FSH8 con las siguientes características:

- Rango de frecuencias de 9KHz a 8 GHz.
- Alta sensibilidad ($< -141\text{dBm}$ (1Hz), con preamplificación $< -161\text{dBm}$ (1Hz))
- 20 MHz de ancho de banda de demodulación para señales LTE.
- Baja incertidumbre de medida.
- Funciones de medición para todas las tareas de medición importantes relacionadas con la puesta en marcha y mantenimiento de sistemas de transmisión.
- Analizador de dos puertos.

Para el proyecto se utilizaron dos equipos EttusResearchUSRP N210 con dos tarjetas hijas de acuerdo a las siguientes especificaciones.

- WBX 50-2200 MHz Rx/Tx (40 MHz): El WBX es un transceptor de un amplio ancho de banda que proporciona una salida de hasta 100mW de potencia y una figura de ruido de 5dB. El WBX suministra una capacidad 40MHz de ancho de banda y es ideal para aplicación que requieren acceso a un buen número de banda dentro del rango de 50 MHz – 2,2 GHz.
- CBX 1200-6000 MHz Rx/Tx (40 MHz): El CBX es un full-duplex, transceptor de banda ancha que cubre una banda de frecuencia de 1,2 GHz a 6 GHz con un ancho

de banda instantáneo de 40 Mhz.v El CBX puede servir a una amplia variedad de áreas de aplicación, incluyendo la investigación de WiFi, estaciones base celulares, investigación de radio cognitiva y RADAR.

Adicionalmente se emplearon 3 pares de antenas dentro de las bandas de operación de las tarjetas hijas, estas son:

- VERT400 Antenna: Incluye un VERT400 144 MHz, 400 MHz y 1200 MHz tribanda antenna vertical omnidireccional.
- VERT900 Antenna: Incluye un VERT900 824-960 MHz, 1710-1990 MHz Quad-band celulares / PCS y antenna vertical ISM Band omnidireccional, en 3dBi Gain.
- VERT2450 Antenna: Incluye una VERT2450 Dual Band 2,4-2,48 GHz y antenna vertical 04.09 a 05.09 GHz omnidireccional, en 3dBi Gain.

Para cada una de estas antenas se realizó una caracterización a través del analizador vectorial el VNA FSH8 obteniendo los siguientes resultados:

VERT400 Antenna:

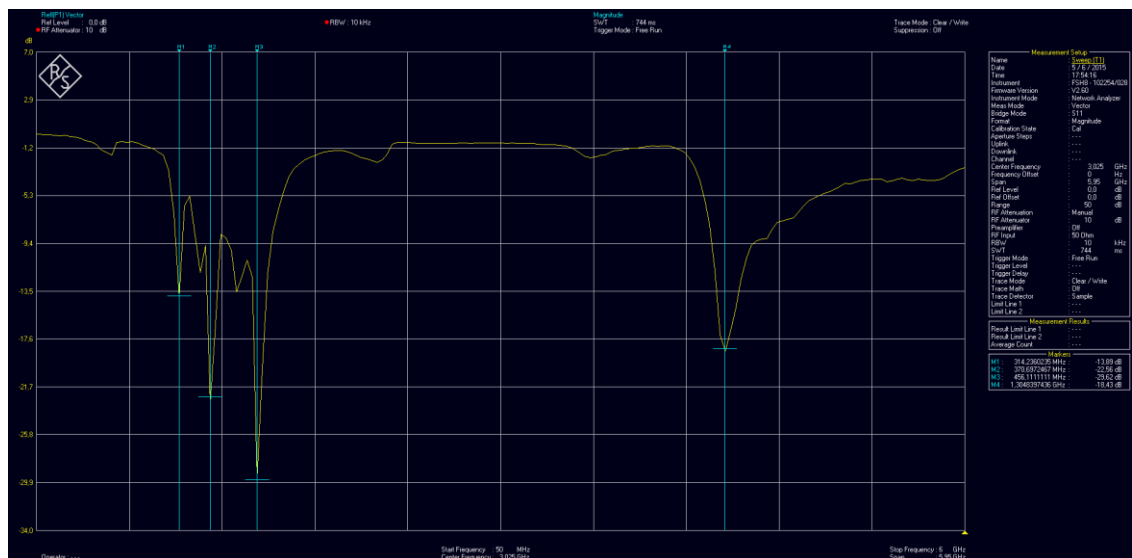


Figura 33 Caracterización Antena VERT400

Fuente: Propia

VERT900 Antenna:



Para esta antena se detectó un buen funcionamiento en frecuencias bajas en los punto de 256 MHz 946 MHz y 1,74 GHz, cumple con las características del fabricante y tiene buen funcionamiento para las bandas de UHF. A diferencia de la VERT 400 esta antena tiene un mejor comportamiento a frecuencias bajas ideal para operar en banda FM.

La antena 2450 por ser una antena de longitud más corta tiene buena operación en las frecuencias de 2,24 GHz y 5,32 GHz ideal para las bandas móviles y de Wifi. Dado lo anterior esta antena tiene un comportamiento muy regular con el parámetro S11 en las bandas de UHF y por supuesto en FM.

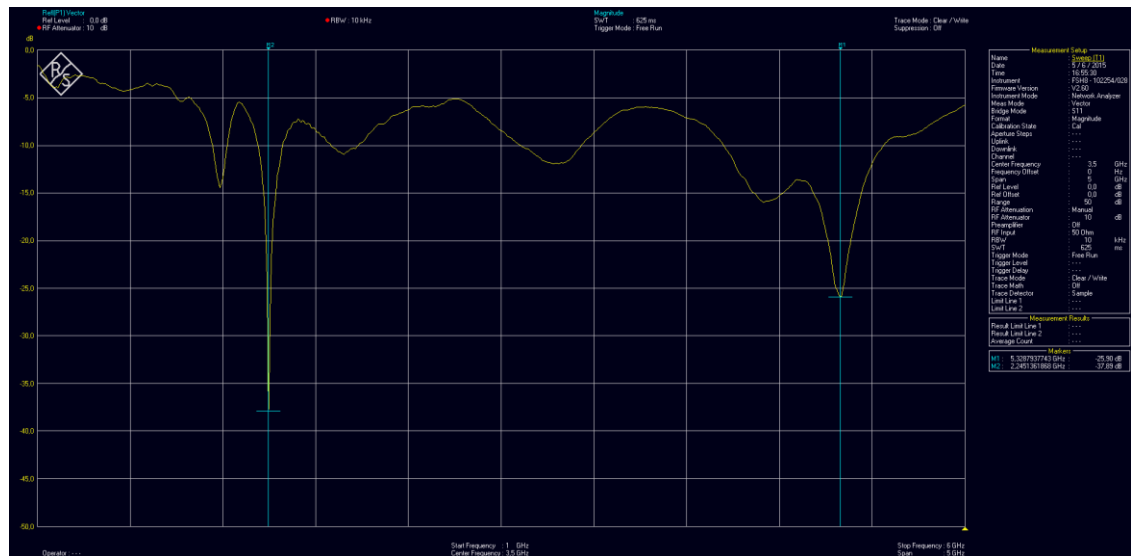


Figura 35 Caracterización VERT2450.

Fuente: Propia

Antena UHF Terraza Universidad Santo Tomas.

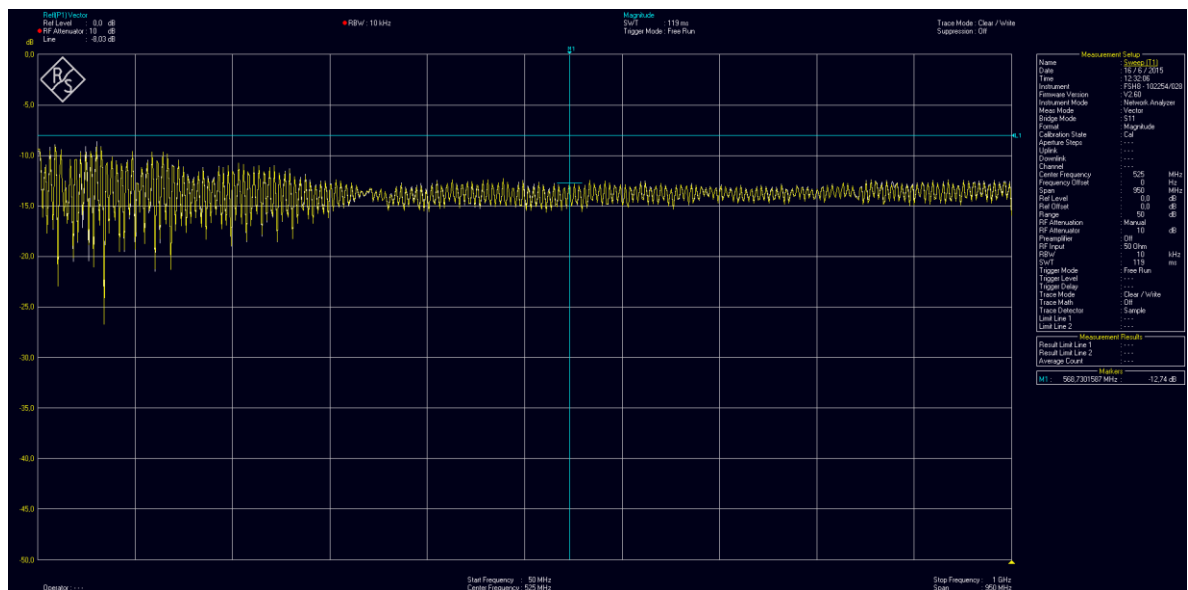


Figura 36 Caracterización antena UHF azotea Universidad Santo Tomás

Fuente: Propia

Esta antena ubicada en la azotea del edificio LJ Torres tiene una conexión desde la

sala ETM13. De acuerdo a su estructura corresponde a una antena yagui con aproximadamente 10 directores y un reflector, esta antena tiene la característica que opera en un gran ancho de banda. Observando la Figura 36 se puede evidenciar de acuerdo al nivel de referencia ubicado en los -8dB la capacidad de la antena para captar señal desde los 50MHz hasta 1GHz. Aunque su patrón de radiación es característicamente direccional aplica para la medición de señal con los equipos USRP N210 dentro de las bandas de FM y dividendo digita. (Rango de 700 a 800 MHz).

En la Figura 37 se puede observar la ubicación de las antenas UHF utilizadas para las medidas y caracterización del espectro.



Figura 37 Ubicación de las Antenas Yagui

Fuente: Propia

5.2.4 Densidad Espectral

Con el fin de establecer un modelo de densidad espectral para analizar la banda de FM y el dividendo digital, se llevó a cabo un diseño previo, de un analizador de espectro de señales como senos, cosenos y señales cuadradas por medio del software MATLAB.

Teniendo en cuenta que para lograr esta medición es necesario que la señal este en discreto, lo primero fue hacer un proceso de muestreo que realiza la conversión de una señal continua a una discreta, para lograr este proceso se toman muestras

de la señal cada determinado instante de tiempo, es por eso que fue necesario considerar una frecuencia de muestreo denotada de la siguiente forma: [44]

$$x[n] = Xc(n\tau) \quad -\infty < n < \infty \quad (28)$$

Donde $x[n]$ es la secuencia de muestras.

$Xc \rightarrow$ es la señal continua.

$F_s \rightarrow$ es la frecuencia de muestreo.

$F_s = 1/\tau$.

$\tau \rightarrow$ Periodo de muestreo.

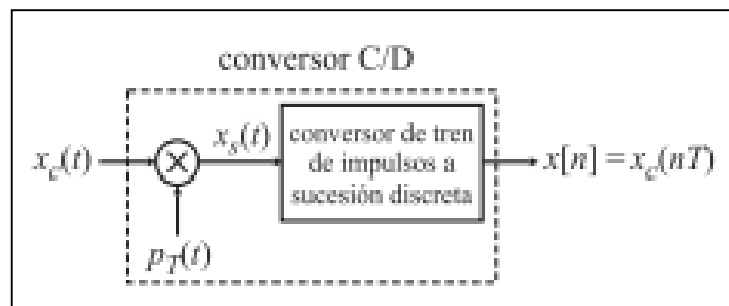


Figura 38 Modelo matemático del muestreo

Fuente: Contribución de las técnicas de procesamiento digital de señales en el diseño de filtros digitales.[44]

Al tener la señal discreta se utilizaron diferentes mecanismos de Densidad Espectral para evaluar cual mecanismo era más asertivo.

En el primer proceso se definió la siguiente señal sinusoidal

$$2 * \cos(100 * 2 * \pi * n / f_m) + 3 * \cos(400 * 2 * \pi * n / f_m) \quad (29)$$

A la cual se le aplicó la transformada de Fourier por medio de la función $ff = \text{fft}(xn)$ en Matlab y luego se multiplicó por su conjugado para de esta forma hallar la densidad espectral $\text{frvsam} = ff * \text{conj}(ff)$.

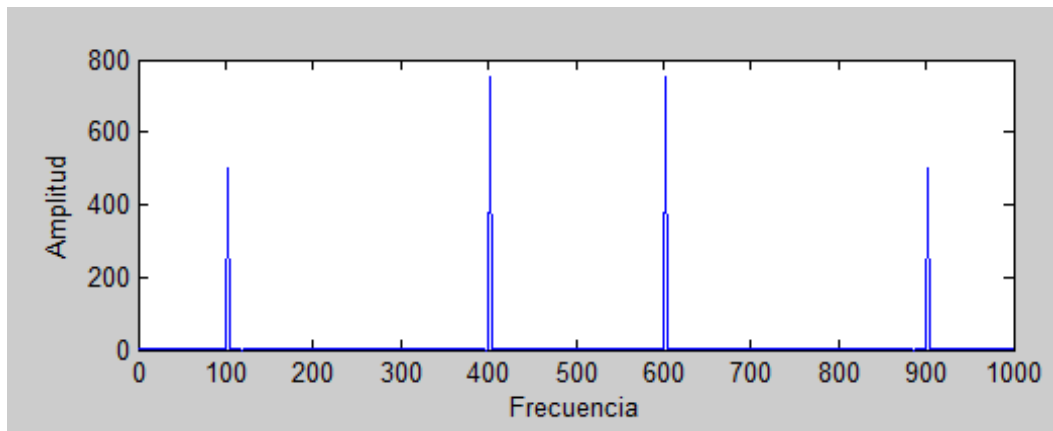


Figura 39 Densidad Espectral de una señal sinusoidal

Fuente: Propia

Como se observa en la Figura 39 se puede ver los componentes del espectro de la señal sinusoidal en los rangos de frecuencias adecuados.

El segundo modelo establecido se basa en la definición de densidad espectral $|x(f)|^2$, donde se aplicó a la señal la transformada de Fourier, y luego se halló el valor absoluto de esta forma $x_{\text{modulo}} = \text{abs}(Y).^2$; dando como resultado la amplitud de la señal, para la frecuencia se utilizó la frecuencia de muestreo y la cantidad de muestras de la señal $f = ((f_m) * (1:N))/N$ y así se procedió a graficar frecuencia vs amplitud como se ve en la Figura 40 con la misma señal de antes.

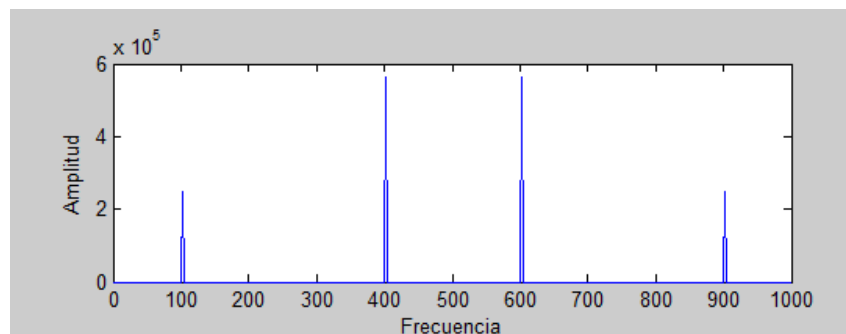


Figura 40 Densidad Espectral de una señal cosenosoidal

Fuente: Propia

En la Figura 41 se evidencia la frecuencia de corte de la señal en 100Hz y 400Hz; utilizando la misma definición de densidad espectral se utilizó la siguiente función

$\text{abs}(\text{fftshift}(\text{fft}(x)))$ donde la función `fftshift` reordena el vector en orden creciente de frecuencias.

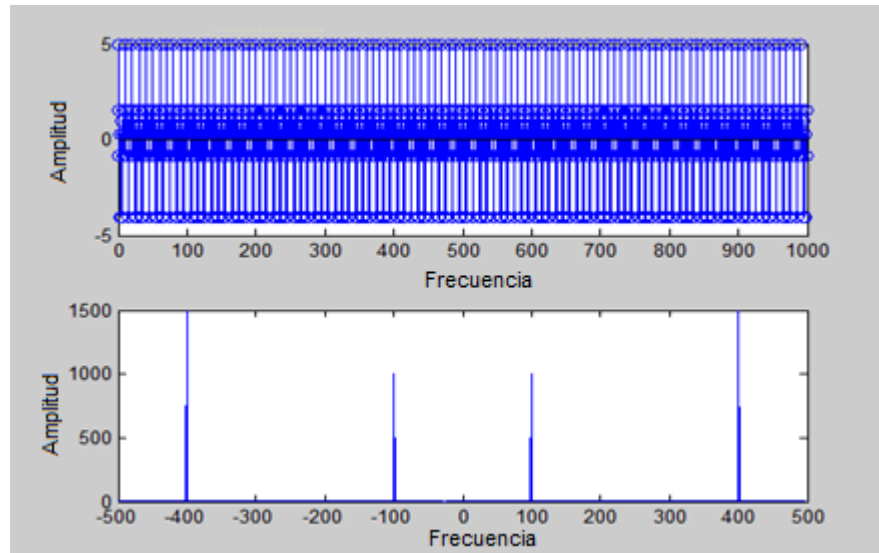


Figura 41 Densidad Espectral de una señal cosenosoidal

Fuente: Propia

Utilizando el proceso anterior se aplicó la densidad espectral a una señal cuadrada como se muestra en la Figura 42

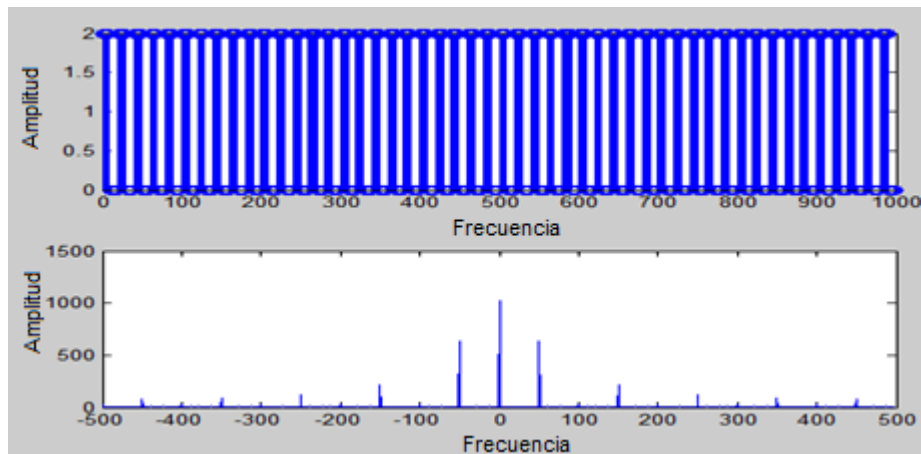


Figura 42 Densidad Espectral de una señal cuadrada

Fuente: Propia

Para una señal $\sin(2\pi \cdot 1000 \cdot t)$ se realizó el mismo proceso pero se modificó el rango de frecuencias en el cual se iba a presentar la señal utilizando

$$f_{hz} = -0.5 * f_s : f_s/N : 0.5 * f_s * \left(1 - \frac{1}{N}\right) \quad (30)$$

De este modo se procedió a graficar y se utilizó la función axis para controlar la apariencia y los ejes de la gráfica.

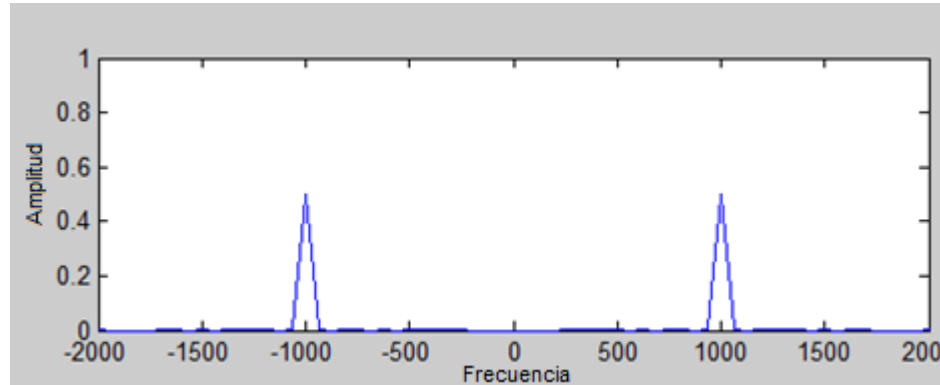


Figura 43 Densidad Espectral de una señal senosoidal

Fuente: Propia

Este proceso fue implementado en Simulink utilizando las siguientes funciones:

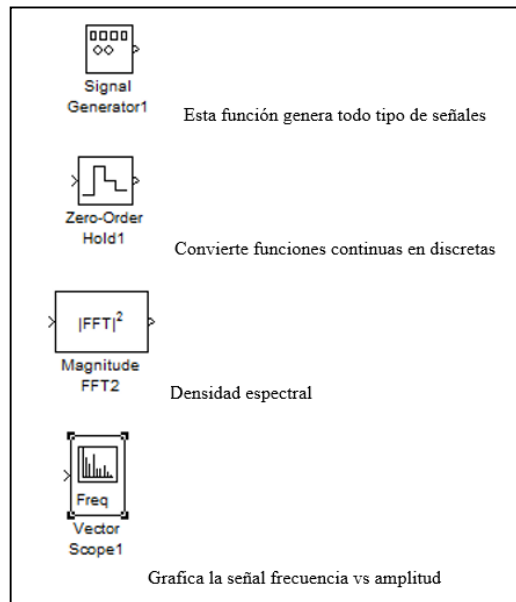


Figura 44 Funciones de Simulink

Fuente: Propia

Utilizando las funciones mencionadas anteriormente se implementó un diseño para la densidad espectral utilizando Simulink.

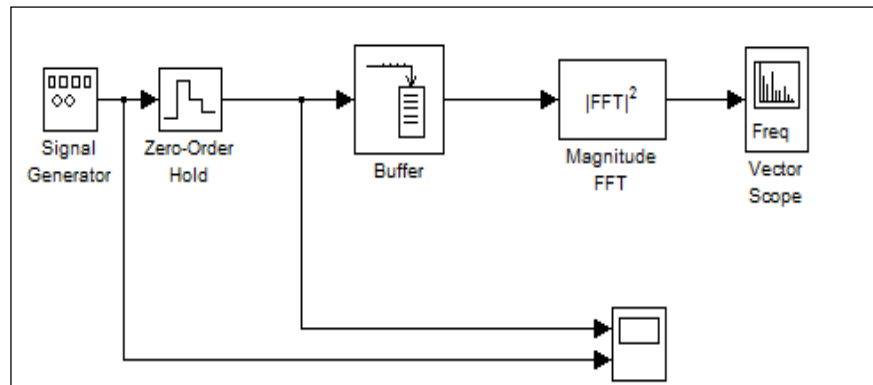


Figura 45 Diseño de modelo en Simulink

Fuente: Propia

Generando una señal cuadrada se obtuvo como resultado:

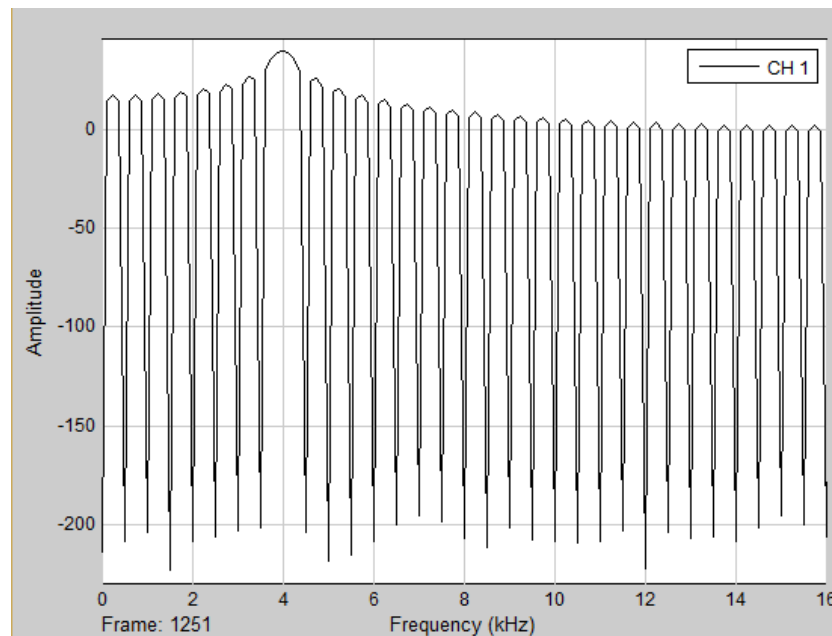


Figura 46 Densidad espectral de una señal cuadrada en Simulink

Fuente: Propia

Por medio de la definición de densidad espectral se realizó dicho proceso con una señal cuadrada:

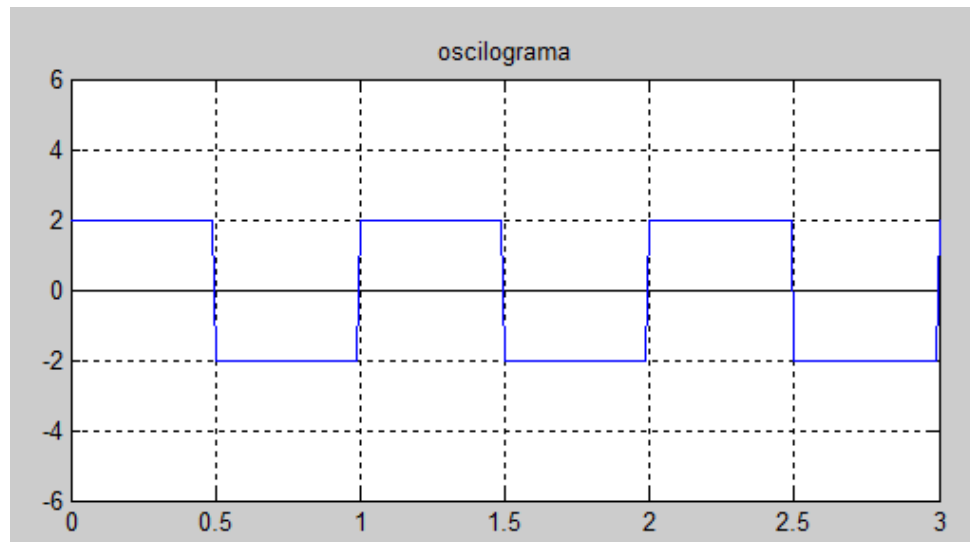


Figura 47 Señal Cuadrada

Fuente: Propia

Obteniendo como resultado:

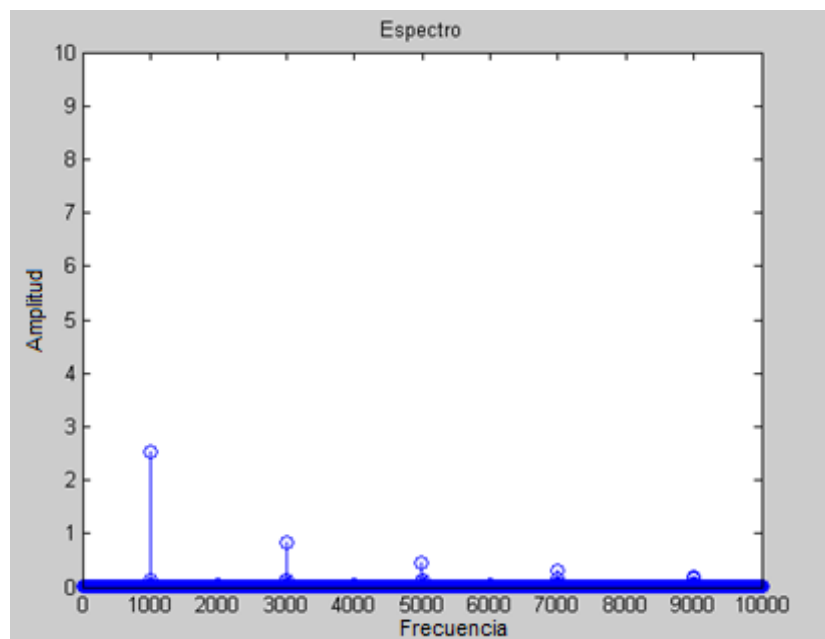


Figura 48 Densidad espectral de la señal cuadrada

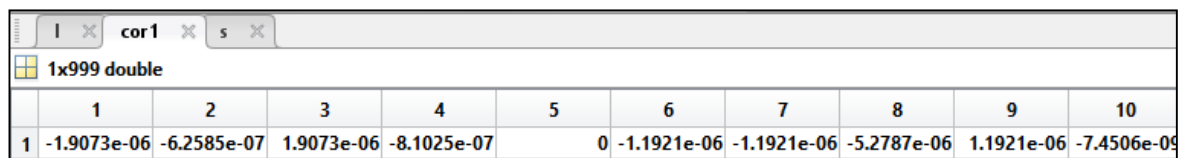
Fuente: Propia

Como se observa en la Figura 48 se encuentra la densidad espectral respectiva a una señal cuadrada identificando sus diferentes componentes.

5.2.5 Correlación

Para determinar la relación que existe entre dos señales se utilizaron los métodos de correlación, que determinan los cambios de una señal a otra. Para las primeras pruebas realizadas se utilizó la función Xcorr, que determina la correlación cruzada entre dos señales. De esta forma valores positivos y grandes indicaron que las señales son parecidas mientras que los valores que se aproximen a cero indicarán por el contrario que las señales no tienen parecido.

En este caso se tuvo en cuenta una señal sinusoidal y una señal cuadrada en la que la correlación cruzada obtuvo valores cercanos a cero como se muestra a continuación:



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-1.9073e-06	-6.2585e-07	1.9073e-06	-8.1025e-07	0	-1.1921e-06	-1.1921e-06	-5.2787e-06	1.1921e-06	-7.4506e-06

Figura 49 Valores de Correlación cruzada entre una señal sinusoidal y una señal cuadrada

Fuente: Propia

Para corroborar la correlación entre las dos señales y facilitar su análisis se determinó el coeficiente de correlación por medio de la función corrcoef obteniendo como resultado -0,0055 lo que indica que las señales no se encuentran correlacionadas debido a que las dos señales tienen componentes espectrales diferentes al compararlos basándose en la fórmula:

$$r = \frac{N(\sum_{n=0}^{N-1} xy) - (\sum_{n=0}^{N-1} x)(\sum_{n=0}^{N-1} y)}{\sqrt{[N(\sum_{n=0}^{N-1} x^2) - (\sum_{n=0}^{N-1} x)^2][N(\sum_{n=0}^{N-1} y^2) - (\sum_{n=0}^{N-1} y)^2]}} \quad (31).$$

Además indica que una señal está desfasada respecto a la otra debido a que el coeficiente de correlación es negativo.

Coeficiente de correlación señal Cuadrada vs Señal Cosenosiodal
-0,0055

Figura 50 Coeficiente de Correlación de una señal sinusoidal y una señal cuadrada

Fuente: Propia

Este mismo proceso se realizó para dos señales sinusoidales dando como resultado 0.9135 lo que indica su alto nivel de correlación debido a que ambas señales contenían parecidos componentes espectrales.

Coeficiente de correlación de dos señales Sinusoidales
0.9135

Figura 51 Coeficiente de Correlación de dos señales sinusoidales

Fuente: Propia

5.2.6 Medición para FM

Para realizar el respectivo análisis de la señal en primer lugar se capturó una matriz de datos pertenecientes a la banda de FM (88MHz a 108MHz) por medio de los equipos de USPR N210, lo que permitió el análisis respectivo de densidad espectral y correlación.

Debido a que se necesitaban más datos para poder comprobar la detección espectral, se realizaron varias capturas de la banda FM obteniendo datos en diferentes instantes de tiempo, para este proceso se utilizó la librería de recepción del USPR asociado a MATLAB.

Para realizar estas capturas se tomaron 2000 frecuencias a 10KHz, cada una con 4096 muestras. A continuación se encuentra el programa mediante el cual se realizaron las diferentes capturas.

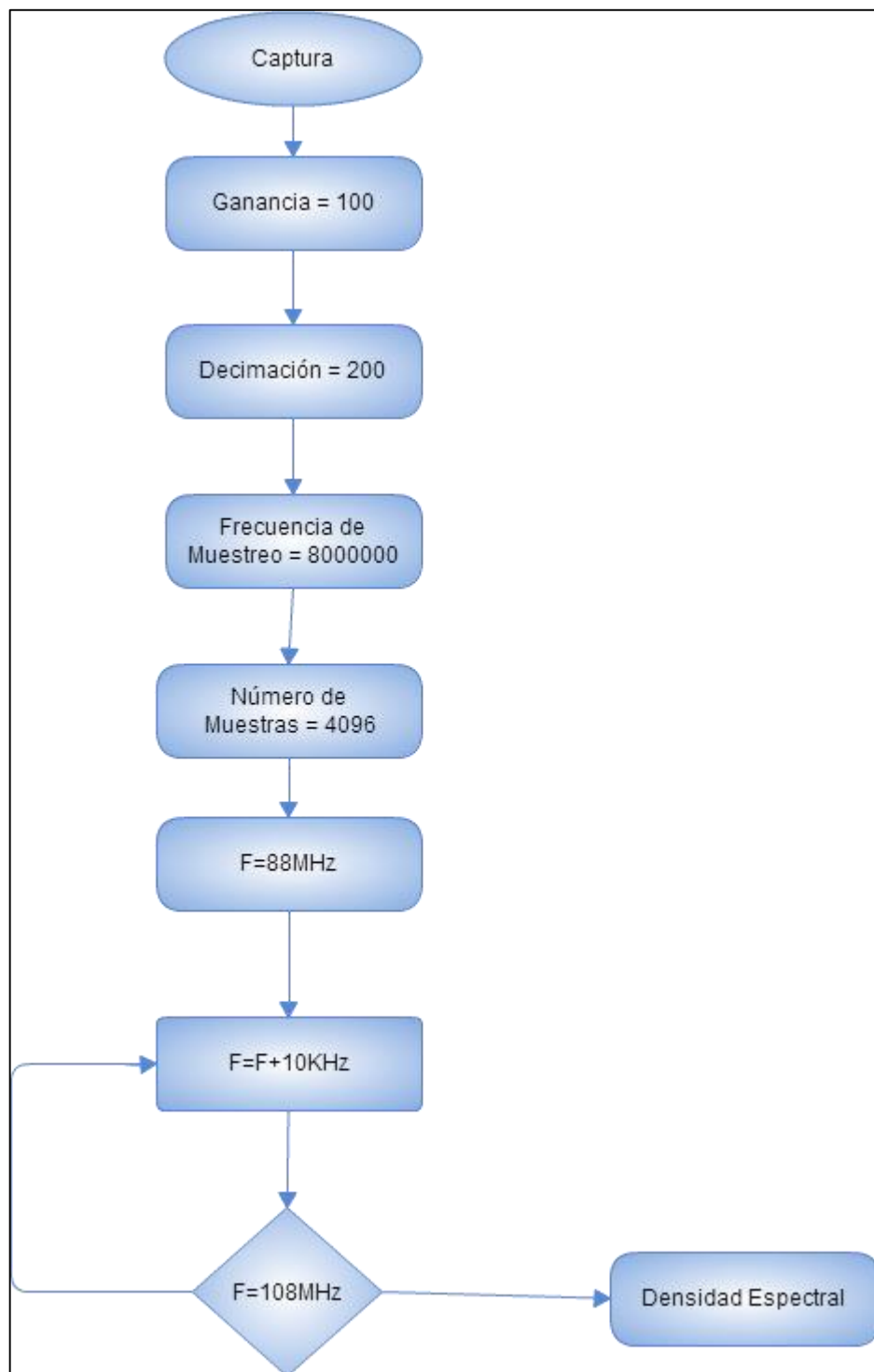


Figura 52 Diagrama de Captura de Datos FM

Fuente: Propia

5.2.7 Medición para Banda del Dividendo Digital

Para el análisis del dividendo digital en la banda de 698MHz a 806MHz se trabajó en su fase inicial con el equipo Rohde Schwarz ETL TV, teniendo un sistema de TV analógica, en donde se pudieron caracterizar las portadoras existentes de televisión analógica en el dividendo como se observa en Figura 53 y Figura 54.

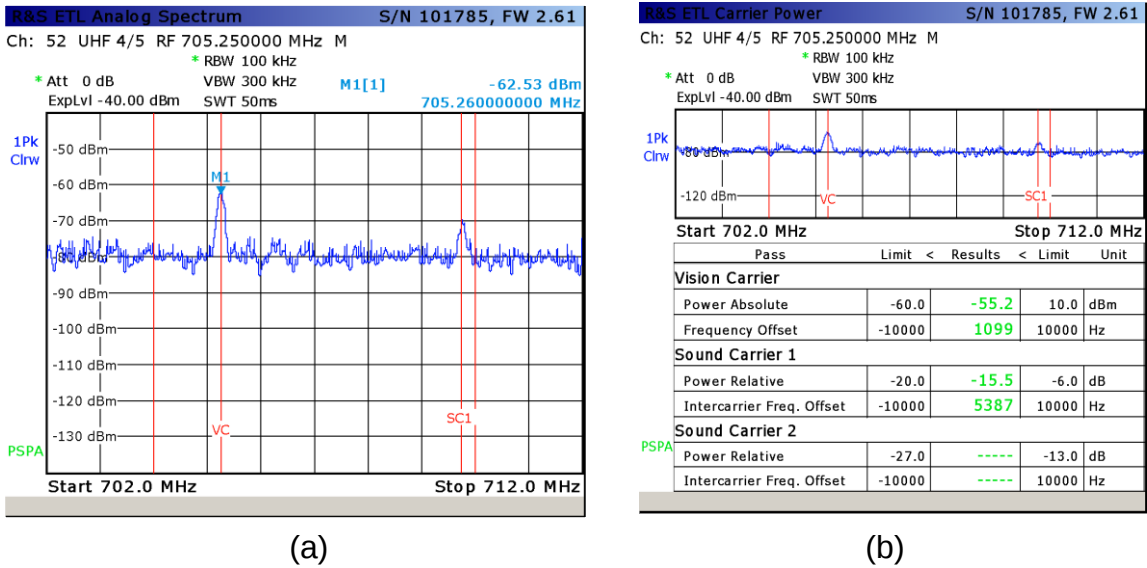


Figura 53 Análisis canal 52 (a) Espectro de Frecuencia (b) Análisis de Portadoras

Fuente: Propia

En la Figura 53 se observan las componentes espectrales de las portadoras tanto de audio como de video pertenecientes al canal de televisión número 52, ubicado entre las frecuencias 702 MHz - 712MHz, y también sus respectivos valores de potencia.

De la misma manera en la Figura 54 se ilustran las componentes del canal 54, en donde sus portadoras presentan una clara variación con respecto al canal 52.

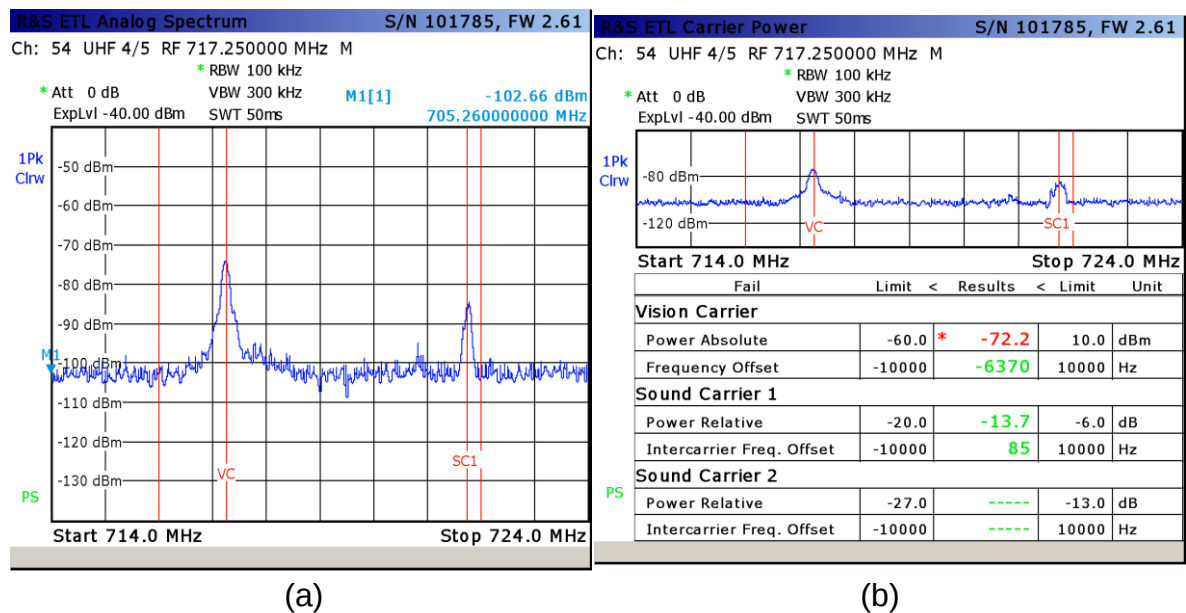


Figura 54 Análisis canal 54 (a) Espectro de Frecuencia (b) Análisis de Portadoras

Fuente: Propia

Para observar el contenido de los canales de televisión anteriormente mencionados, se realizó una captura de imagen con el analizador de televisión. Y se verificó su contenido al obtener como resultado lo que se observa en la Figura 55:

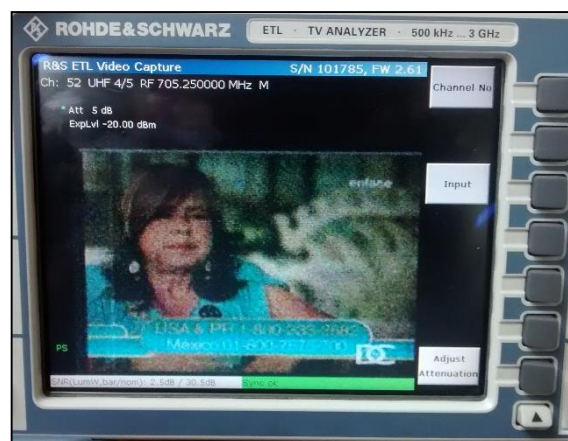


Figura 55 Imagen correspondiente al canal de televisión número 52, ubicado en la frecuencia 705.25MHz

Fuente: Propia

Teniendo identificadas las componentes espectrales correspondientes a los canales de televisión presentes dentro de la banda, se procedió a realizar una captura de la información presente en los 108 MHz del rango de frecuencias del dividendo digital, mediante un programa realizado con MATLAB y ejecutado con la ayuda del dispositivo de radio definido por software USRP N210.

En esta fase de captura de datos, fue necesaria la utilización de una antena Yagui ubicada en la terraza de la universidad Santo Tomás sede central, la cual cumplió con las características necesarias para esta banda

Las características de funcionamiento de la antena que cumplió con los requerimientos de la banda, se muestran en la Tabla 4.

PARÁMETROS ANTENA TIPO YAGUI	
GANANCIA	18-20 dB
IMPEDANCIA	75 Ω
FRECUENCIA	470-860 MHz
CANALES UHF	21-69
DIPOLOS	10

Tabla 4 Características de funcionamiento de la antena Yagui

Por medio del proceso de captura para la banda del dividendo digital que se observa en la Figura 56, se archivaron varias capturas con el fin de llevar a cabo un análisis espectral.

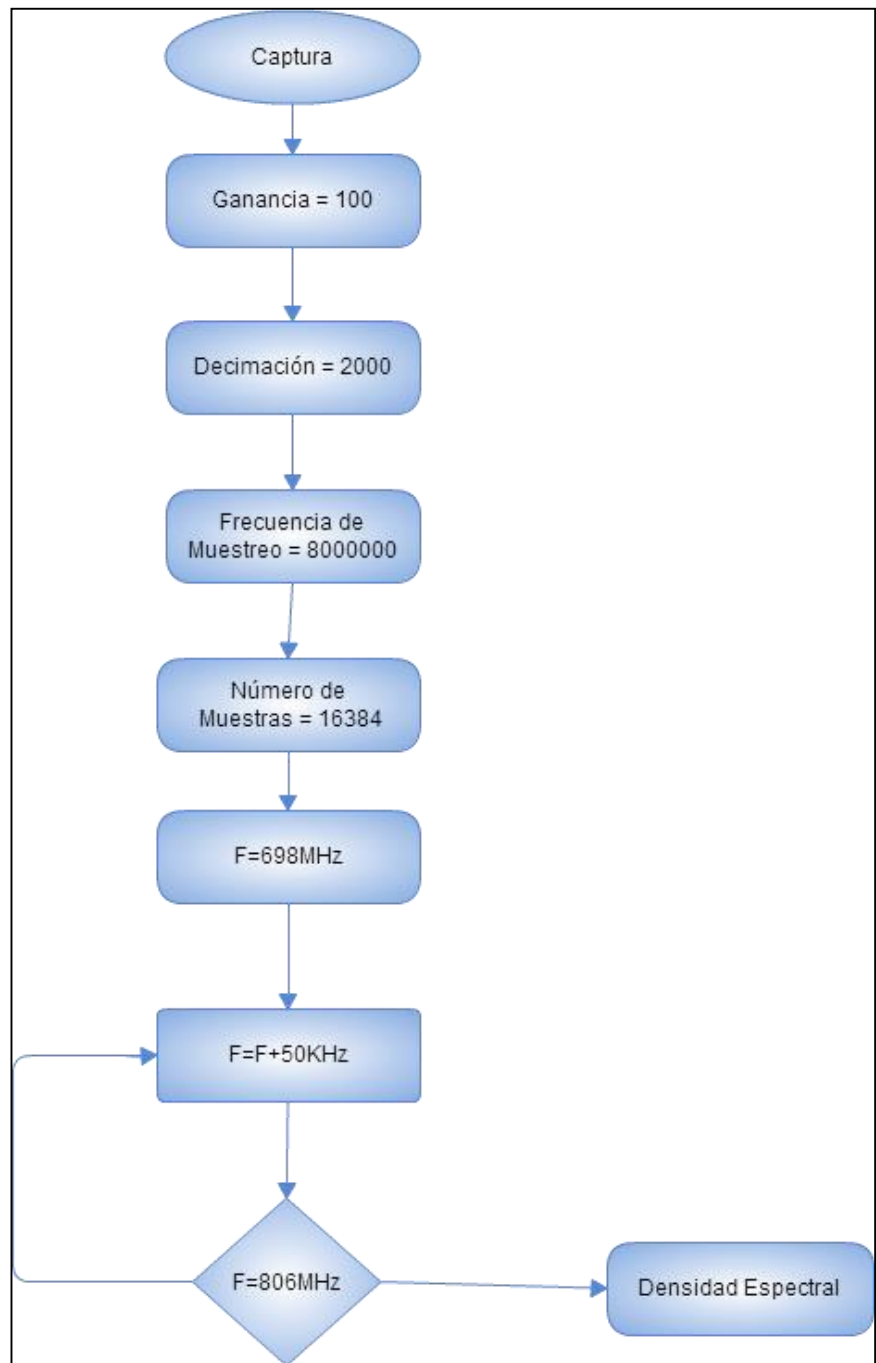


Figura 56 Proceso de captura de información correspondiente a la banda de dividendo digital

Fuente: Propia

5.2.8 Análisis de Densidad Espectral

Una vez realizadas las capturas correspondientes para las bandas FM y dividiendo digital se aplicó densidad espectral a cada una de las capturas realizadas.

- *Densidad Espectral Banda FM*

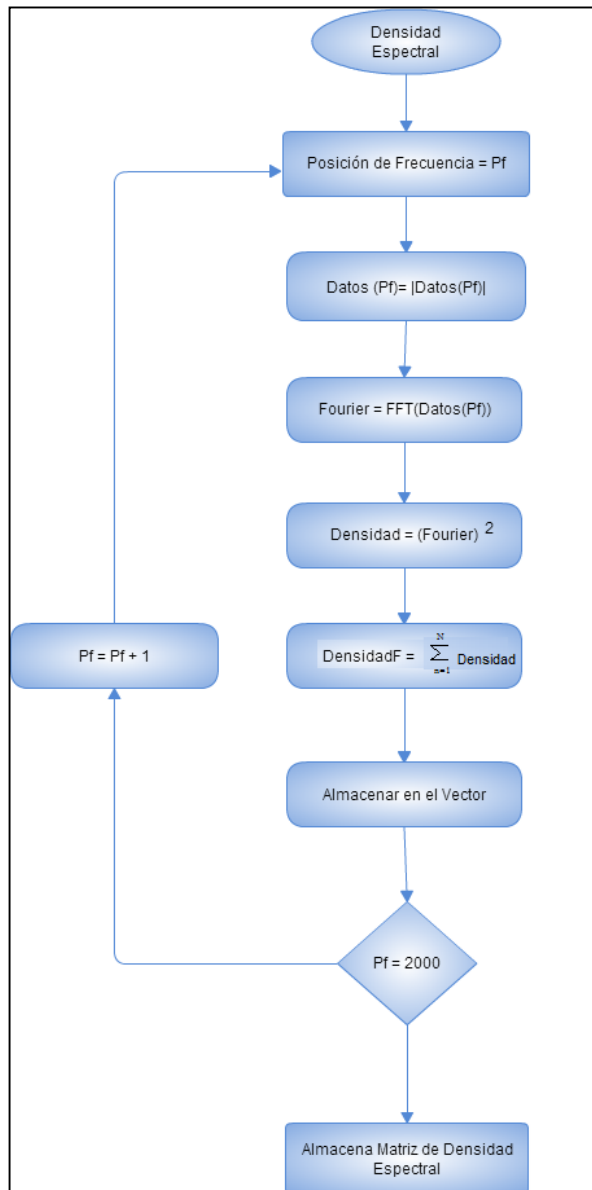


Figura 57 Proceso de Densidad Espectral FM

Fuente: Propia

Para el análisis de densidad espectral de la banda de FM se utilizó las matrices de datos generadas en las capturas realizadas anteriormente, a cada uno de estos componentes se le realizó un barrido mediante el cual se le aplicó el modelo matemático de densidad espectral de $|x(f)|^2$ permitiendo analizar los componentes en frecuencia de la banda.

El proceso utilizado para el análisis de la Densidad Espectral se encuentra en la Figura 57 Donde se tuvo en cuenta el número de frecuencias que se capturaron por cada matriz de la banda FM que en este caso fue de 2000 y para el eje de frecuencias se realizó un barrido a 10KHz desde 88MHz hasta los 108MHz.

Para hallar la Densidad Espectral Promedio se tuvo en cuenta la densidad espectral de cada realizando la suma de todas las densidades espectrales y dividiéndolas por el número de capturas con el fin de caracterizar la densidad espectral de la banda FM por medio de la siguiente definición:

$$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{n=1}^N FFT(n)^2}{c} \quad (32)$$

Donde $C = \text{Número de Capturas}$

$n = \text{Número de muestras por captura}$

Obteniendo como resultado la graficas de densidad espectral que se evidencia en la Figura 58.

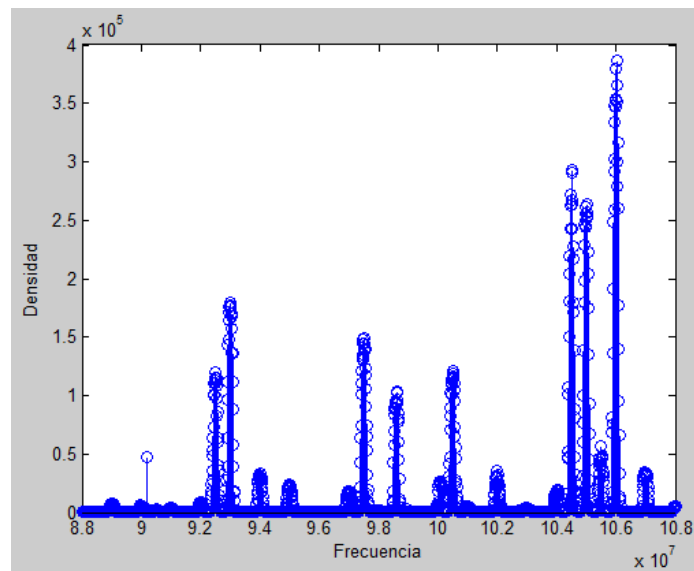


Figura 58 Densidad Espectral Promedio de la Banda de FM

Fuente: Propia

Los picos altos que se encuentran en la Figura 58 indican las señales portadoras de algunas emisoras radiales.

- *Densidad Espectral Banda Dividendo Digital*

Para la banda del Dividendo Digital comprendida entre 698MHz y 806MHz se realizaron dos tipos de barridos el primero de la banda completa a 50KHz y un segundo barrido a 10KHz de los primeros 20MHz con el fin de observar en detalle los componentes espectrales de la banda del dividendo.

Al igual que la banda de FM se realizó varias capturas de la banda del Dividendo Digital con el fin de hallar la Densidad Espectral Promedio Utilizando la definición de:

$$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{n=1}^N FFT(n)^2}{c} \quad (33)$$

Donde $C = \text{Número de Capturas}$

$n = \text{Número de muestras por captura}$

Y luego se graficó para observar las componentes espectrales como se muestra en la Figura 59.

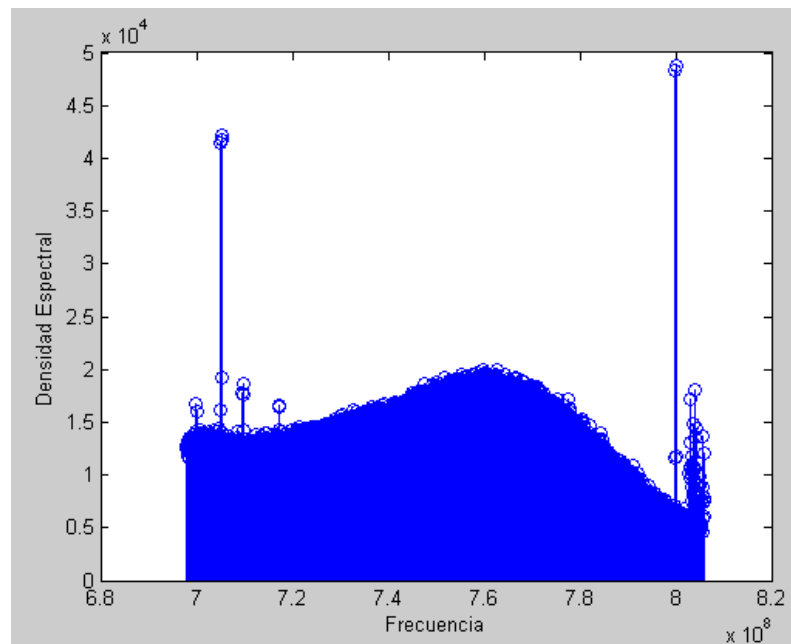


Figura 59 Densidad Espectral Promedio de Banda Completa del Dividendo Digital a 50KHz

Fuente: Propia

En la banda se observa un marcado piso de ruido y unas señales portadoras que tienen presencia en las frecuencias iniciales del dividendo digital como se había observado con el analizador de televisión y que corresponden a las ilustradas en la Figura 59.

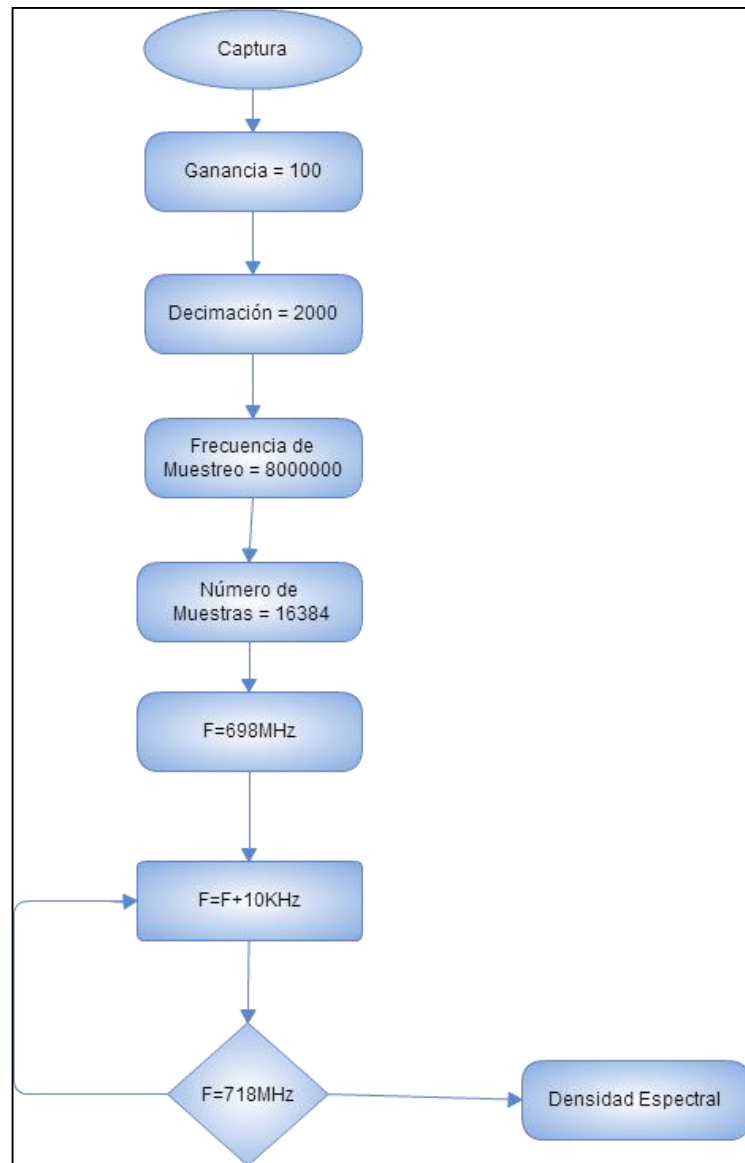


Figura 60 Proceso de captura de datos para los primeros 20 MHz de la banda del dividendo digital.

Fuente: Propia

Al tener conocimiento de la presencia de las portadoras en las frecuencias iniciales de la banda dentro de la información recolectada, se realiza una captura de datos de 20 MHz empezando en 698MHz y terminando en 718MHz, con una toma de muestras cada 10KHz, con el fin de observar con más detalle las componentes espectrales de cada uno de los canales de televisión.

La obtención de la densidad fue realizada luego de la captura de información detallada de la banda, cuyo proceso fue muy similar al realizado para la banda completa, pero en donde se limitaron las frecuencias tanto de inicio como de finalización, y la de toma de muestras. Empezando en 698MHz y terminando en 718MHz como se observa en la Figura 60.

De igual manera se identificaron las componentes con la diferencia que este captura arroja una información de forma más detallada que con la banda completa.

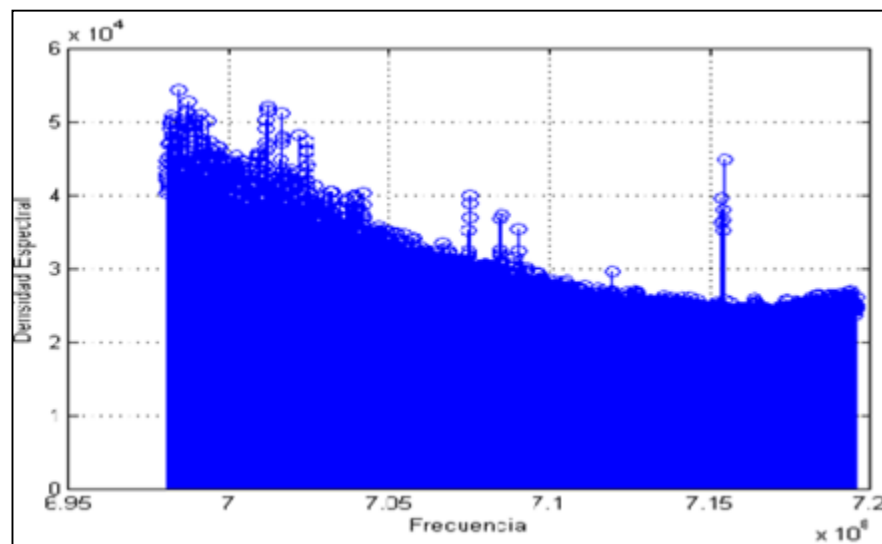


Figura 61 Densidad espectral de los primeros 20 MHz de la banda de dividendo.

Fuente: Propia

En esta medición se observa claramente la portadora de video del canal 54, y con bajo nivel la del canal 52.

5.2.9 Análisis de Correlación

Para la correlación de cada una de las bandas analizadas se tuvo en cuenta las densidades espectrales de cada captura, debido al modelo de variación del tiempo para señales ciclo estacionarias, donde se correlacionaron la primera captura

respecto a las tres siguientes de esta forma las correlaciones se realizaron respetivamente:

C1 Vs C2	$x(t)$ Correlación $x(t - \tau)$
C1 Vs C3	$x(t)$ Correlación $x(t - 2\tau)$
C1 Vs C4	$x(t)$ Correlación $x(t - 3\tau)$
C1 Vs C5	$x(t)$ Correlación $x(t - 4\tau)$

Tabla 5 Correlaciones

Donde $t = \text{Tiempo}$

$\tau = \text{Tiempo de cada captura (4 Horas)}$

5.2.9.1 Banda FM

Para la banda de FM se realizó la correlación de la emisora 97.9MHz con un ancho de banda de 200KHz como se muestra en la densidad espectral de la emisora 97.9MHz de la Figura 62.

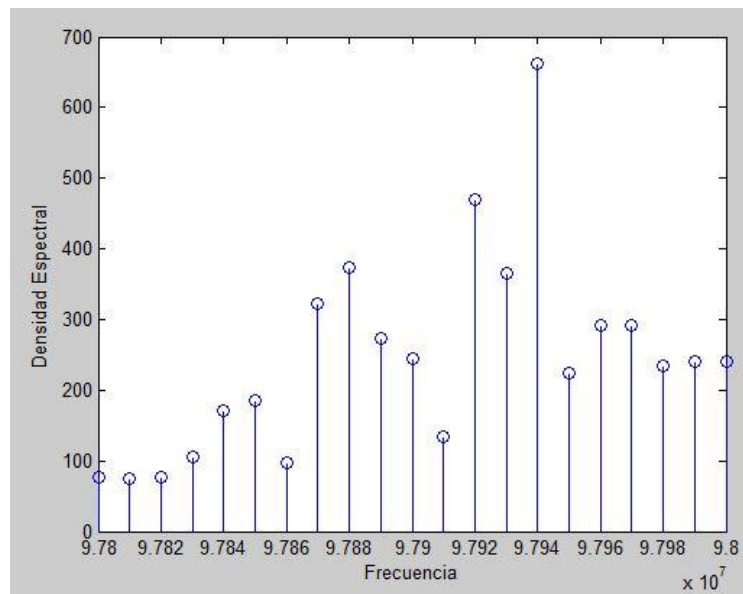


Figura 62 Densidad Espectral Emisora 97.9MHz

Fuente: Propia

A continuación se evidencia el proceso utilizado para las correlaciones de emisora de 97.9MHz en la Figura 63.

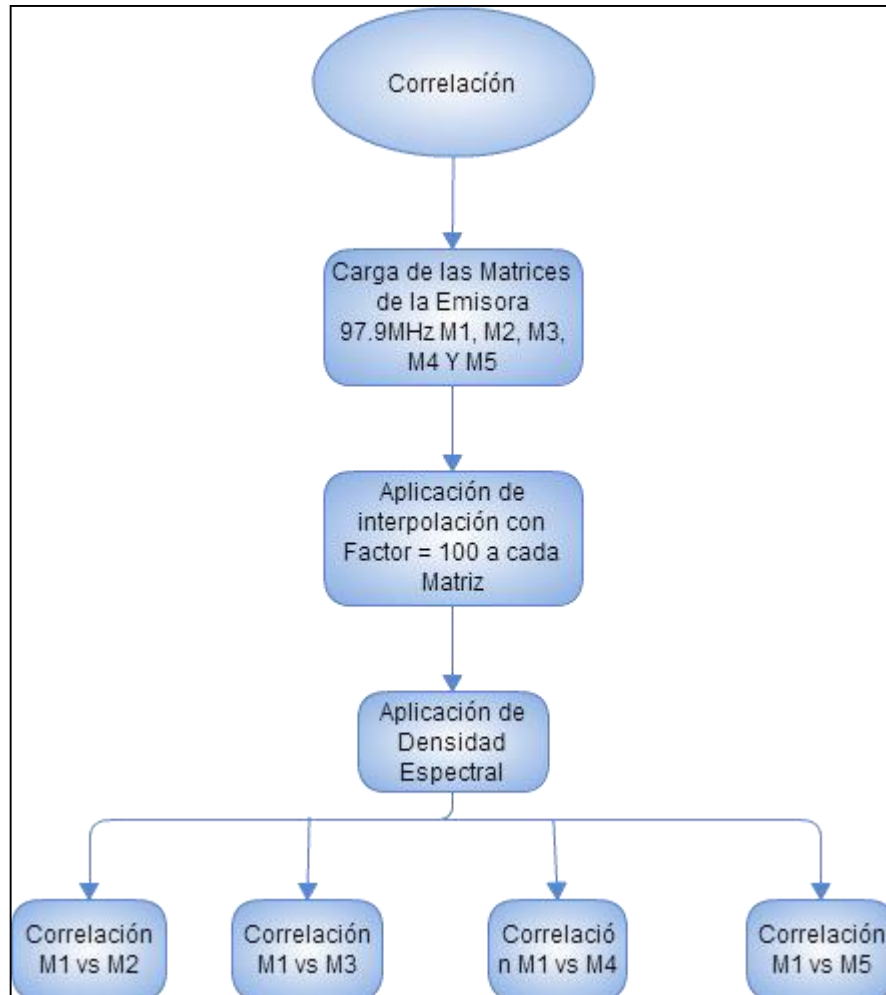


Figura 63 Proceso de Correlación

Fuente: Propia

Para las correlaciones de la banda de FM se utilizó la función `corrcoef` con el fin de analizar la correlación entre las densidades espectrales de cada frecuencia, de esta forma se correlacionaron las densidades espectrales de cada captura frecuencia a frecuencia obteniendo como resultado una matriz como la que se muestra a continuación en la Tabla 6.

Frecuencia	Cor1	Cor2	Cor3	Cor4
97800000	0,99998041	0,99997869	0,99997838	0,99998052
97810000	0,99997403	0,99997758	0,99996054	0,90001938
97820000	0,97523813	0,99996477	0,99987559	0,99983109
97830000	0,99991008	0,99996712	0,99988083	0,9997716
97840000	0,99809826	0,99987874	0,99987172	0,99866082
97850000	0,98170874	0,99263667	0,99962487	0,99894894
97860000	0,98852508	0,961929	0,99805293	0,99756548
97870000	0,97415203	0,97231283	0,98671188	0,99970033
97880000	0,98944511	0,99324422	0,99803514	0,99719969
97890000	0,9913159	0,9957688	0,99347301	0,99511955
97900000	0,998338	0,97365511	0,99662508	0,99968108
97910000	0,99883978	0,98853736	0,99588667	0,92488637
97920000	0,99935336	0,99459389	0,98341291	0,99857093
97930000	0,99902125	0,99676975	0,99645183	0,99958595
97940000	0,99999156	0,99418072	0,99993162	0,99851679
97950000	0,99995902	0,99616031	0,99989395	0,99992916
97960000	0,99998693	0,99675342	0,99996221	0,99998694
97970000	0,99997674	0,99626782	0,9999024	0,9999821
97980000	0,9999852	0,99968921	0,99994612	0,99998568
97990000	0,99996595	0,99996064	0,9999549	0,99997081
98000000	0,99997652	0,99997516	0,99998127	0,99998173

Tabla 6 Correlaciones Emisora 97.9MHz

En la Tabla 6 se evidencia la correlación por cada frecuencia de las densidades espectrales de cada captura, de esta forma la primera fila indica la frecuencia a correlacionar, la segunda fila es la correlación entre la primera captura y la segunda, la tercera fila indica la correlación entre la primera captura y la tercera, la cuarta fila indica la correlación entre la primera captura y la cuarta y por último en la quinta fila se encuentra la correlación entre la primera captura y la quinta. Teniendo como resultado que las capturas de la emisora 97.9MHz se encuentran altamente correlacionadas puesto que se acercan a 1.

Por último se realizó un análisis estadístico de los valores obtenidos en las correlaciones de la emisora 97.9MHz en los cuales se evidencia el alto grado de correlación que se muestra a continuación en la Tabla 7.

	Cor1	Cor2	Cor3	Cor4
Media	0,9949401	0,99296199	0,9974959	0,99085119
Desviación	0,00838389	0,0105637	0,00453541	0,02638716
Varianza	7,03E-05	0,00011159	2,06E-05	0,00069628

Tabla 7 Análisis estadístico

5.3 DEFINICIÓN DE MODELOS

5.3.1 Ruido Gaussiano

Para el desarrollo de las simulaciones y pruebas realizadas para la banda de FM y Dividendo, fue necesario implementar un modelo de ruido gaussiano, cuyas propiedades imitaran a las del ruido generado en las bandas trabajadas. Para seleccionar este ruido se utilizó una distribución de probabilidad que corresponde a una distribución normal, lo que permite tener una representación más acertada del ruido presente en cada banda.

Para el desarrollo del ruido gaussiano se estableció una desviación estándar y una media promedio de los datos generados para cada captura, al encontrar dichos valores se procedió a generar el ruido gaussiano. Donde a es la desviación estándar promedio, b la media promedio y la longitud establece la cantidad de muestras que se desea, a continuación en la Figura 64 se evidencia los componente de frecuencia del ruido gaussiano generado.

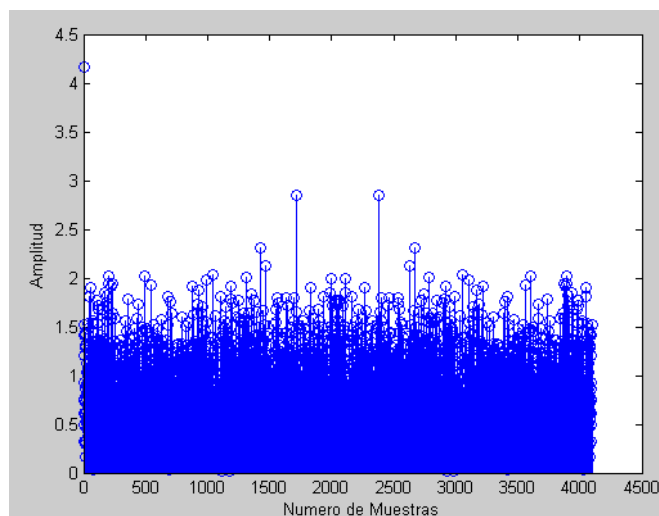


Figura 64 Ruido Gaussiano generado

Fuente: Propia

5.3.2 Modelo de Interpolación

5.3.2.1 Proceso de Interpolación en la banda FM

Para la banda FM en principio se realizó el proceso de interpolación en algunas frecuencias pertenecientes a la banda, Donde fueron tomadas algunas emisoras para de esta forma aumentar su frecuencia de muestreo, una vez identificada la emisora con mayor densidad espectral que en este caso correspondía a la frecuencia 89.9MHz se le realizó el proceso de interpolación como se muestra a continuación en la Figura 65

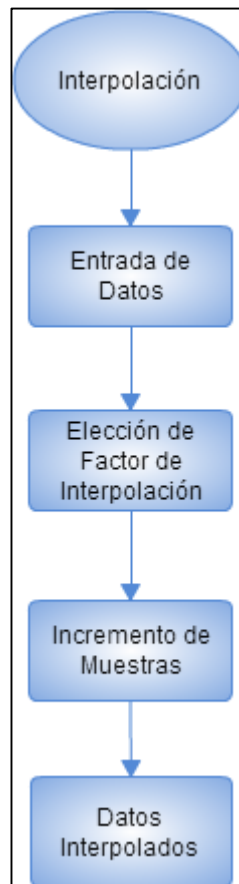


Figura 65 Proceso de interpolación

Fuente: Propia

En el código implementado en la Figura 65 se efectúa el proceso de interpolación teniendo en cuenta parámetros tales como el factor de interpolación, la señal que se desea interpolar y las librerías necesarias para realizar el proceso de interpolación, para poder analizar sus componentes en frecuencia se le halló a la densidad espectral a la señal con su factor de interpolación, para que de esta forma

basándose en la definición de interpolación F-1 se introdujeran las muestras correspondientes, donde F es el factor de interpolación teniendo como resultado:

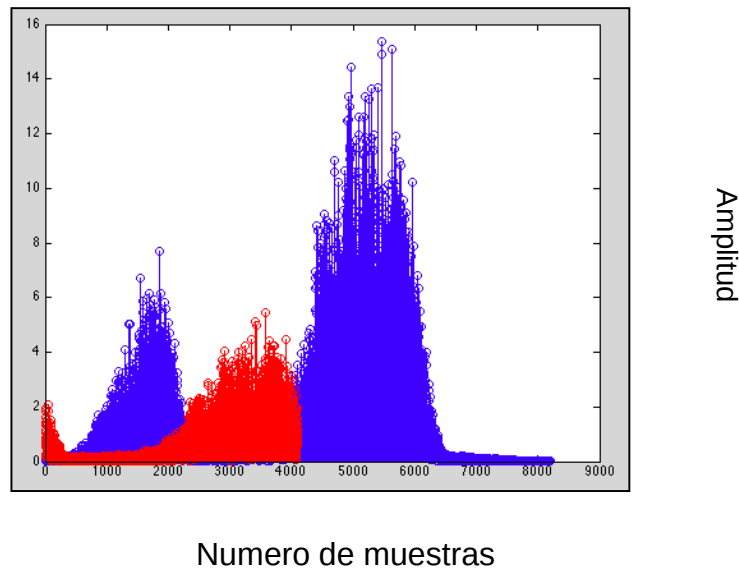


Figura 66 Respuesta en frecuencia del proceso de interpolación con factor de 2

Fuente: Propia

La representación en frecuencia tanto de la señal original como de la interpolada, dan respuesta coherente a un proceso realizado correctamente, dado a que la cantidad de muestras que se tenían inicialmente era 4096, como se ilustra con color rojo en la Figura 66 y su equivalente interpolada en azul con 8192 muestras, lo que confirma que si se introducen $f-1$ muestras entre cada una de las existentes en la señal original.

Con el fin de confirmar su funcionamiento, dicho proceso fue realizado de nuevo con un factor de interpolación correspondiente a 5, con el cual el número de muestras iniciales tendría un incremento y su nuevo valor sería 20480 muestras.

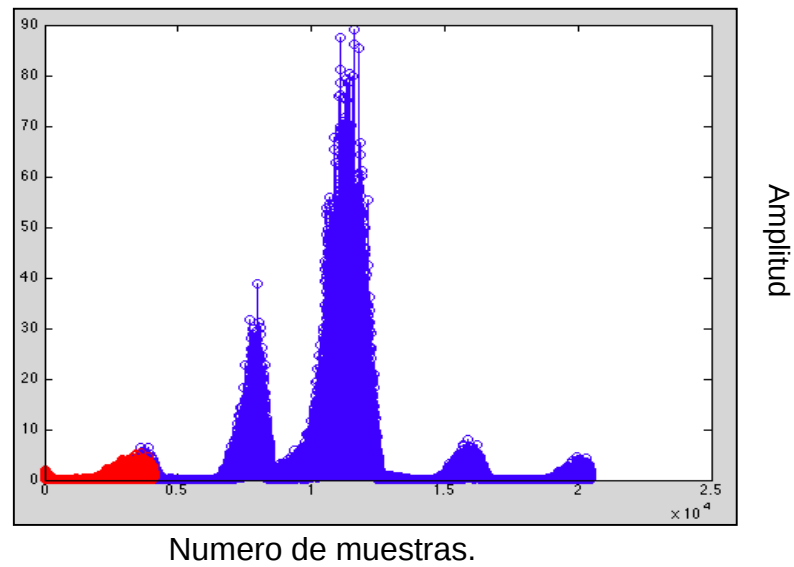


Figura 67 Representación de la señal de FM con un factor de interpolación de 5

Fuente: Propia

5.3.2.2 Proceso de Interpolación en la banda del Dividendo Digital

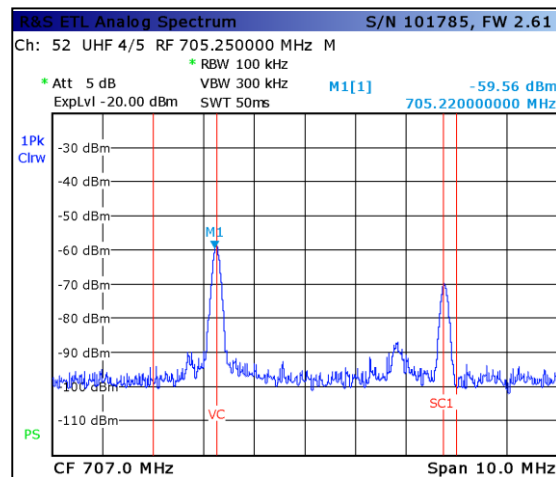


Figura 68 Portadora de información con frecuencia central en 705.25 MHz, perteneciente a la banda del dividendo digital

Fuente: Propia

En la banda del dividendo digital, se lleva a cabo el mismo proceso, en el cual es necesario seleccionar información en la que sea posible visualizar la interpolación de señal. Según una revisión realizada con posterioridad a esta banda, se detectó la presencia de una portadora con un alto nivel situado con frecuencia central en 705.25MHz que se encuentra en la Figura 68 , por lo cual se decidió trabajar con ella.

Con base a esta señal de información, se realizó el proceso de interpolación de forma muy similar a la realizada con la señal perteneciente a la banda de frecuencia modulada (FM), pero teniendo en cuenta las matrices de datos y las posiciones de información de la banda del dividendo digital. Este proceso tuvo en cuenta inicialmente un factor de interpolación correspondiente a 2, que trabajaría de la misma manera que en la banda de FM.

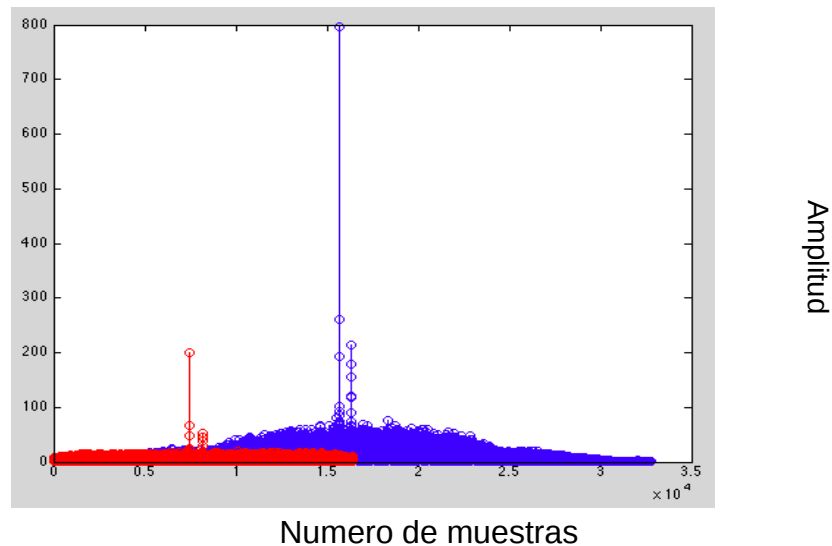


Figura 69 Respuesta en frecuencia del proceso de interpolación con frecuencia central de 705.25 MHz

Fuente: Propia

Al observar que el proceso responde de un modo adecuado, se procede a realizar la última verificación en esta banda, usando un factor de 5 que permitiría reafirmar que esta fase de experimentación funciona con cualquier factor de interpolación.

Esta prueba final, permitió observar que la información sometida al proceso con posición número 726 correspondiente a frecuencia 705.25 MHz, se comporta de

igual manera con diferentes factores de interpolación. Lo cual se afirma con la siguiente figura.

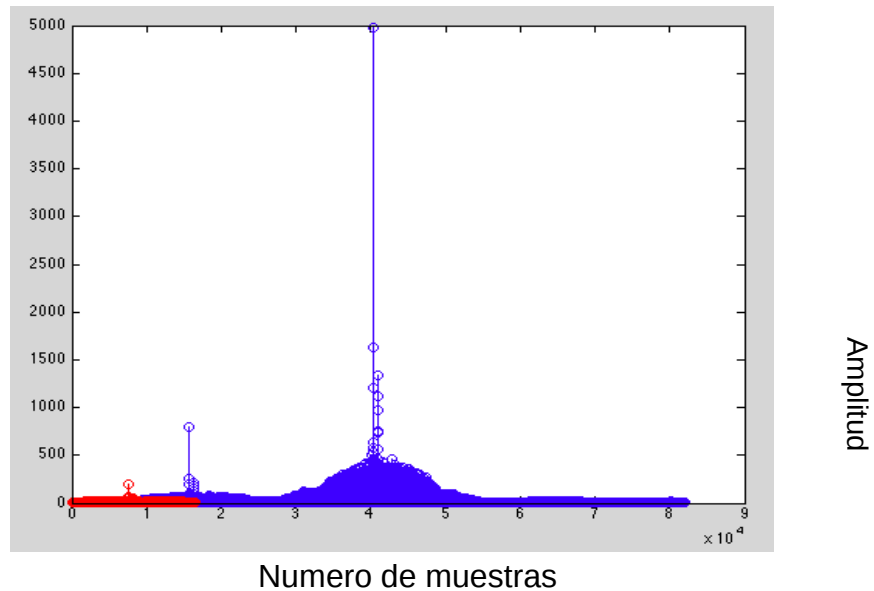


Figura 70 Respuesta en frecuencia de la portadora con factor de interpolación de 5

Fuente: Propia

De esta manera se concluyó con el proceso de interpolación con diferentes frecuencias de trabajo y factores de interpolación, con los cuales se verificó su correcto funcionamiento para luego aplicarlo en el proceso de filtrado adaptativo tanto a la banda de frecuencia de FM como del dividendo digital.

5.3.3 Modelo de Diezmado

El proceso de diezmado tuvo un proceso similar al de interpolación, realizando pruebas inicialmente a la banda de FM y luego en el dividendo digital.

5.3.3.1 Diezmado en la banda de FM

Debido a la función del diezmado, cuya finalidad corresponde a bajar la frecuencia de muestreo en señales, se realizó el diseño del modelo que permitiría realizar este proceso a la banda FM. De la misma manera que en la interpolación, se tomaron los datos correspondientes a una emisora radial, y se llevó a cabo la reducción de muestras. La elegida fue 89.9 MHz, y su proceso fue el siguiente:

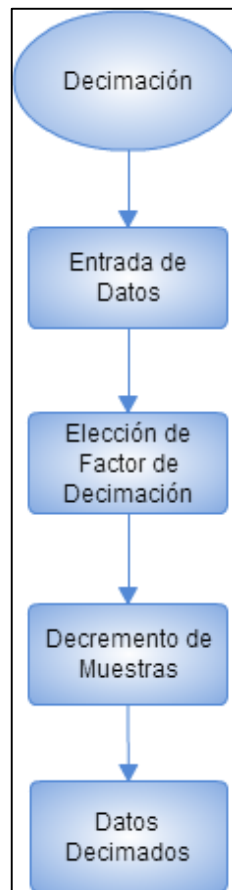


Figura 71 Proceso de diezrado

Fuente: Propia

El proceso tuvo un factor de diezrado correspondiente a 2, lo cual significa la eliminación de 2-1 muestras entre las existentes. El resultado fue una nueva señal con 2048 muestras, debido a que la original tuvo 4096 como se observa a continuación:

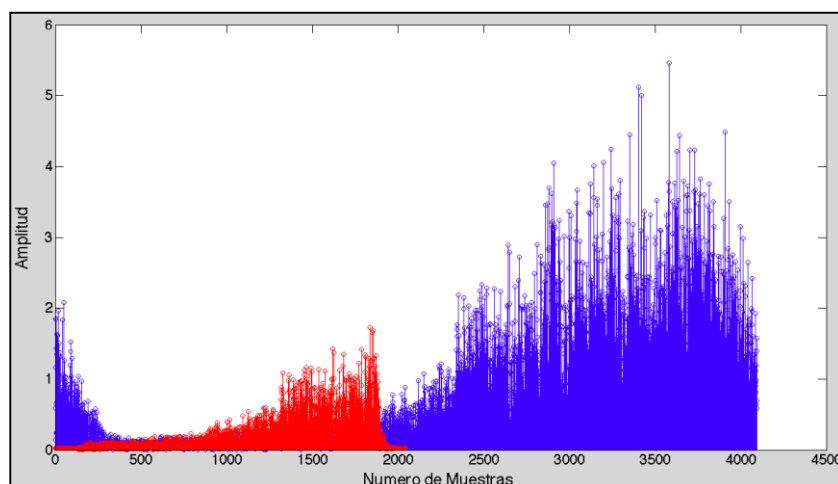


Figura 72 Resultado del diezmado a la señal correspondiente a 89.9MHz

Fuente: Propia

El resultado fue el esperado, y este mismo proceso fue realizado en otras frecuencias con señales portadoras de información de emisoras radiales, en donde el proceso de diezmado tuvo un correcto funcionamiento.

5.3.3.2 Diezmado en la banda del Dividendo Digital

Al verificar el funcionamiento del proceso de diezmado en FM, se realizó el mismo proceso a una señal perteneciente al dividendo digital. La elegida fue la correspondiente a una frecuencia de 705.25MHz, y se trabajó con un factor de diezmado de 2.

La señal original presentó 16384 muestras, por lo cual la señal generada luego del diezmado fue de 8192, como se observa en la figura.

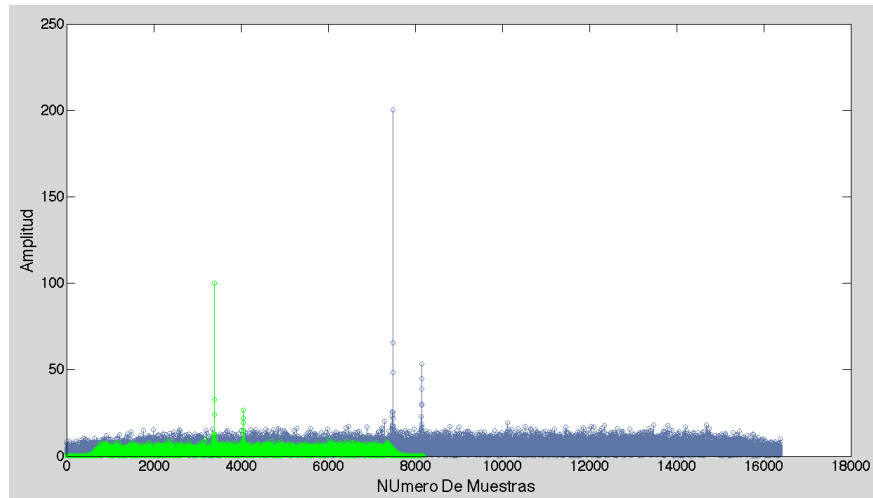


Figura 73 Resultado del proceso de diezmado en la banda del dividendo digital.

Fuente: Propia

Las señales tuvieron un comportamiento adecuado, lo que confirmó que este proceso sería aplicable al sistema de detección mediante filtrado adaptativo.

5.3.4 Modelo de Densidad Espectral

Para el modelo de Densidad Espectral se tuvo en cuenta su definición partiendo de que la densidad espectral se encuentra caracterizada por la siguiente función:

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|x_T(f)|^2}{T} \text{ siempre y cuando exista limite (34)}$$

Que permite analizar la cantidad de potencia que tiene la señal para cada frecuencia; el modelo de Densidad Espectral fue el mismo para cada análisis en la banda de FM y del Dividendo.

Como se observa en la Figura 74 consiste en primer lugar hallar la transformada de Fourier de cada uno de los componentes de la matriz de datos capturada anteriormente, después se le aplica el valor absoluto y este es elevado al cuadrado como indica la definición de densidad espectral, una vez hallados los diferentes componentes espectrales de la matriz se prosigue a realizar una suma promedio de los valores dados para cada muestra obteniendo así un único valor de densidad espectral por frecuencia, por último se realiza un barrido de frecuencias correspondientes a la banda FM, la banda completa del Dividendo Digital o los primeros 20MHz de la banda del Dividendo Digital.

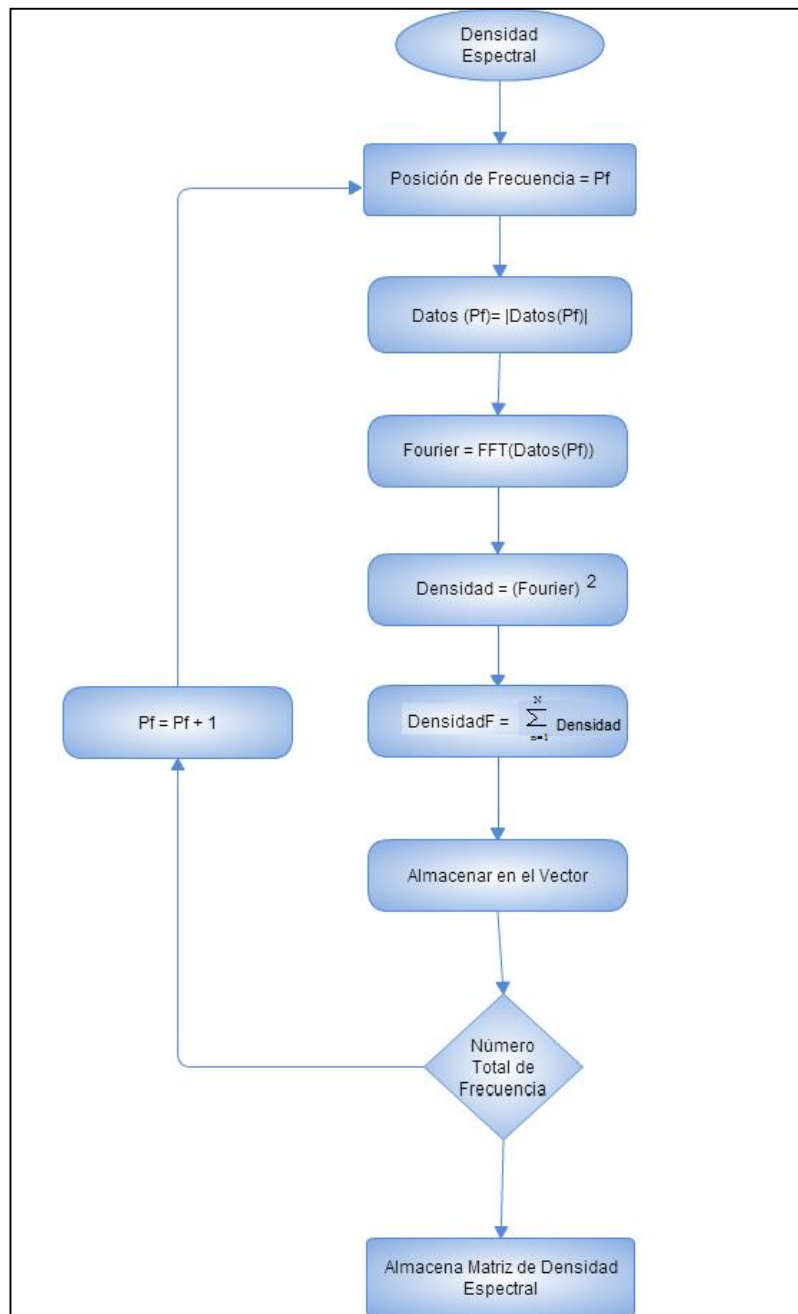


Figura 74 Proceso de Densidad Espectral

Fuente: Propia

De esta forma ya se puede obtener una gráfica de la densidad espectral respecto a cada frecuencia como se muestra a continuación:

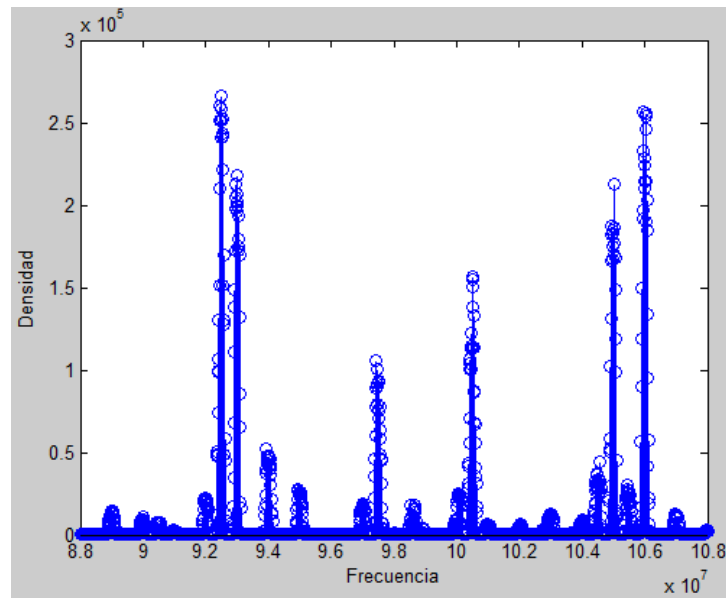


Figura 75 Banda FM Densidad Espectral vs Frecuencia

Fuente: Propia

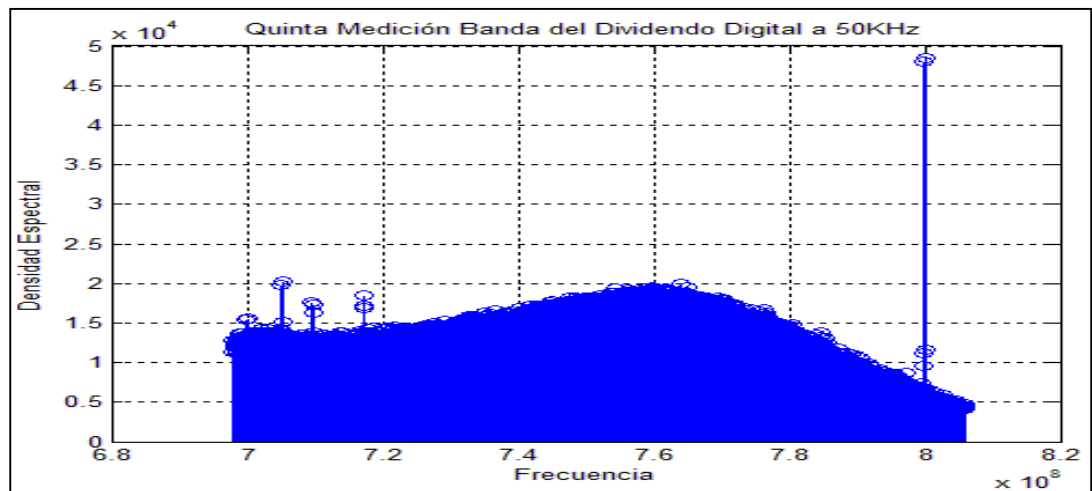


Figura 76 Grafica de dividendo digital en frecuencia vs densidad espectral

Fuente: Propia

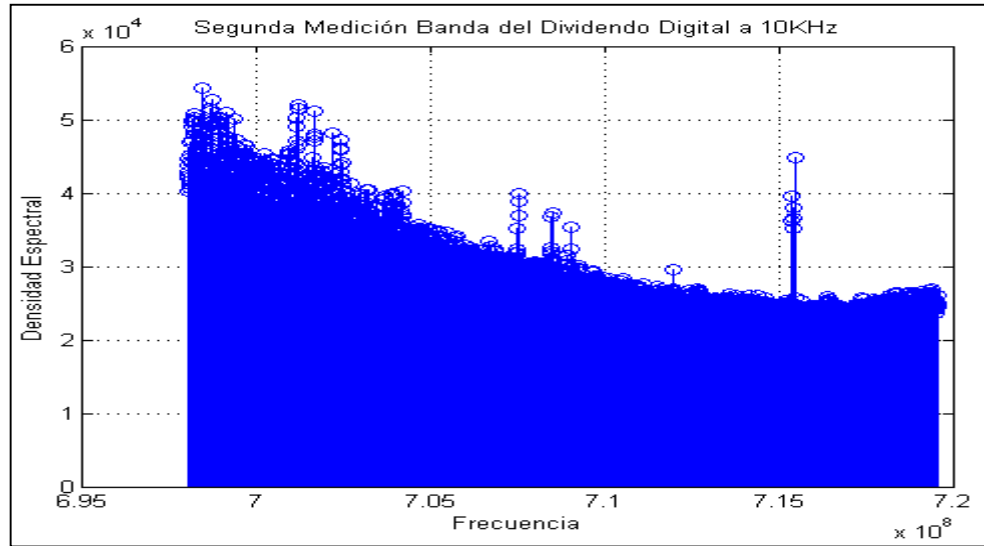


Figura 77 Densidad espectral de los primeros 20 MHz de la banda de dividendo

Fuente: Propia

5.3.5 Modelo de Correlación

Para el modelo de correlación se tuvo en cuenta el método de coeficientes de correlación debido a que este permitió el análisis de la relación entre señales logrando identificar el nivel de correlación puntualmente, el modelo de coeficiente de correlación se define como la correlación cruzada por la energía de las señales utilizadas y por tanto se obtendrá un solo valor de correlación para la comparación entre señales. Lo que define como coeficiente de correlación como:

$$\rho_{xy}(k) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n-k)}{[\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \sum_{n=0}^{N-1} y^2(n)]^{1/2}} \quad (35)$$

Así el coeficiente de correlación toma valores en el intervalo $[-1,1]$, donde el valor de -1 indica máxima correlación con señales desfasadas y el valor de 1 indica máxima correlación. De esta forma para la implementación de la correlación para cada banda se utilizó la función de Matlab `Corrcoef` que permitió dar valores en el intervalo de -1 hasta 1 permitiendo el análisis de la similitud entre densidades espectrales.

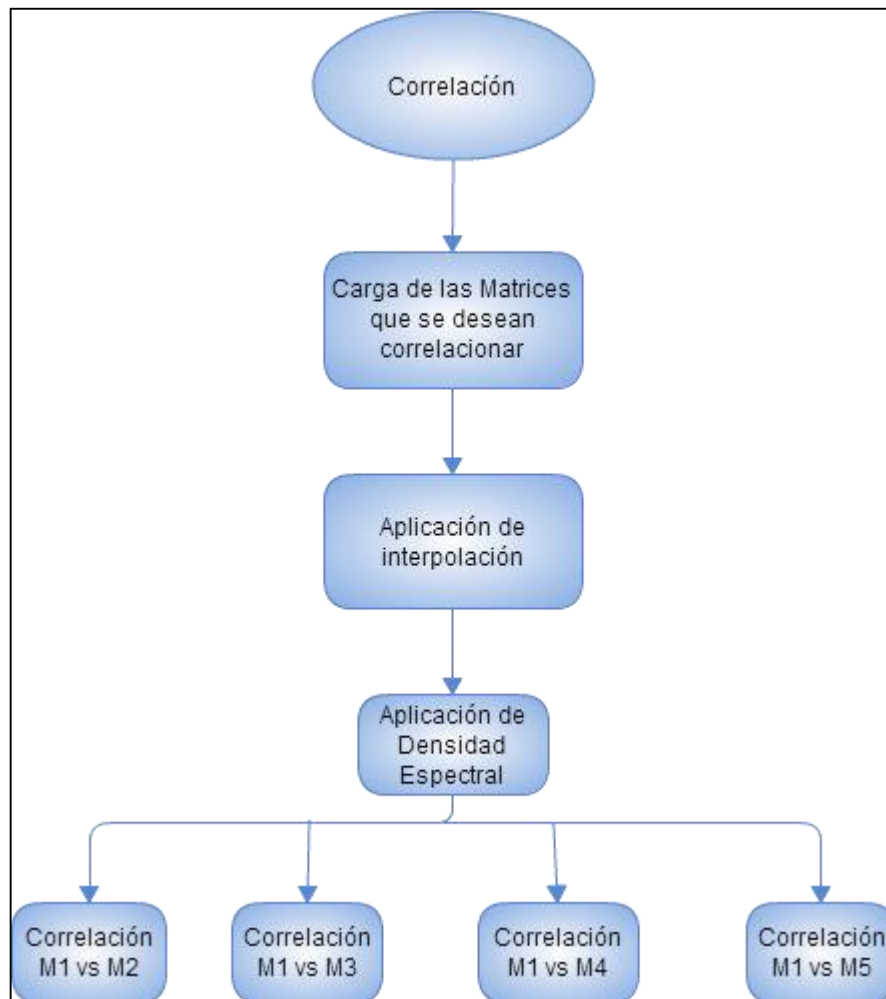


Figura 78 Proceso de Correlaciones

Fuente: propia

Como se observa en la Figura 78 en primer lugar se halla las densidades espectrales correspondientes a cada uno de los componentes de las bandas, una vez obtenida la densidad espectral de la banda correspondiente, se prosigue a correlacionar frecuencia a frecuencia las componentes espectrales obtenidos y se almacena en una matriz como se observa en la Tabla 8 que permite la comparación entre correlaciones de los diferentes componentes espectrales en el tiempo.

Frecuencia	Cor1	Cor2	Cor3	Cor4
97800000	0,99998041	0,99997869	0,99997838	0,99998052
97810000	0,99997403	0,99997758	0,99996054	0,90001938
97820000	0,97523813	0,99996477	0,99987559	0,99983109
97830000	0,99991008	0,99996712	0,99988083	0,9997716
97840000	0,99809826	0,99987874	0,99987172	0,99866082
97850000	0,98170874	0,99263667	0,99962487	0,99894894
97860000	0,98852508	0,961929	0,99805293	0,99756548
97870000	0,97415203	0,97231283	0,98671188	0,99970033
97880000	0,98944511	0,99324422	0,99803514	0,99719969
97890000	0,9913159	0,9957688	0,99347301	0,99511955
97900000	0,998338	0,97365511	0,99662508	0,99968108
97910000	0,99883978	0,98853736	0,99588667	0,92488637
97920000	0,99935336	0,99459389	0,98341291	0,99857093
97930000	0,99902125	0,99676975	0,99645183	0,99958595
97940000	0,99999156	0,99418072	0,99993162	0,99851679
97950000	0,99995902	0,99616031	0,99989395	0,99992916
97960000	0,99998693	0,99675342	0,99996221	0,99998694
97970000	0,99997674	0,99626782	0,9999024	0,9999821
97980000	0,9999852	0,99968921	0,99994612	0,99998568
97990000	0,99996595	0,99996064	0,9999549	0,99997081
98000000	0,99997652	0,99997516	0,99998127	0,99998173

Tabla 8 Matriz de Correlaciones

Fuente Propia

5.4 APLICACIÓN DE MODELO

Para el análisis de la Banda del dividendo se hicieron dos procesos de captura, el primero de la banda completa (698MHz a 806MHz) a 50KHz y el segundo de los primeros 20MHz de la Banda empezando en 698MHz y terminando en 718MHz a 10KHz.

Para el proceso de densidad espectral y Correlación se implementó el modelo de Interpolación que permitió tener más exactitud debido a que aumento la frecuencia de muestreo con un factor de interpolación de 10.

A la hora de realizar el proceso de densidad espectral se realizó el promedio de las diferentes capturas basándose en la siguiente relación:

$$\frac{\sum_{c=1}^C \sum_{n=1}^N FFT(n)^2}{c} \quad (36)$$

Donde $C = \text{Número de Capturas}$

$n = \text{Número de muestras por captura}$

Obteniendo la Figura 79 y Figura 80 que evidencia los componentes espectrales de la banda completa de Dividendo Digital y los primero 20MHz de la banda del Dividendo Digital respectivamente.

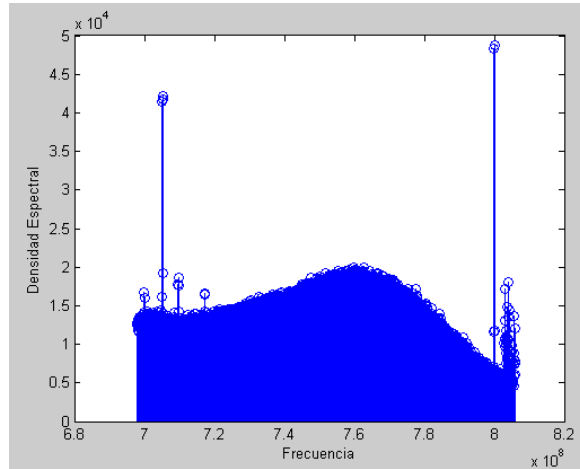


Figura 79 Densidad Espectral Promedio de Banda Completa del Dividendo Digital a 50KHz

Fuente: Propia

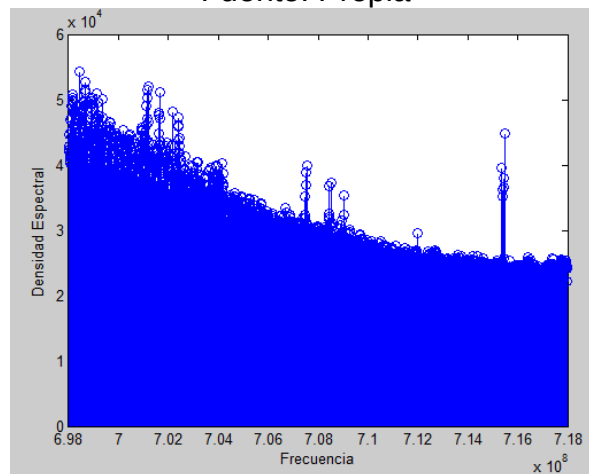


Figura 80 Densidad Espectral Promedio de los primero 20MHz de Banda del Dividendo Digital a 10KHz

Fuente: Propia

Teniendo en cuenta el modelo de Correlación mostrado en la Tabla 9

C1 Vs C2	$x(t)Cor x(t - \tau)$
C1 Vs C3	$x(t)Cor x(t - 2\tau)$
C1 Vs C4	$x(t)Cor x(t - 3\tau)$
C1 Vs C5	$x(t)Cor x(t - 4\tau)$

Tabla 9 Correlaciones

Donde $t = \text{Tiempo}$

$\tau = \text{Tiempo de cada captura (4 Horas)}$

Se realizaron las correlaciones respectivas para cada una de los procesos mencionados anteriormente de la banda completa de Dividendo Digital y los primero 20MHz de la banda del Dividendo Digital a continuación se evidencia en la Tabla 10 y la Tabla 11 de correlación respectivas, donde se analizó alta correlación para ambos procesos debido a que las correlaciones tienden a 1.

Frecuencia	C1vsC2	C1vsC3	C1vsC4
698010000	0,99998767	0,99999568	0,99997847
698060000	0,99995771	0,9999942	0,99999628
698110000	0,99996724	0,99996527	0,99997476
698160000	0,99993514	0,99995483	0,99993669
698210000	0,99996454	0,99999496	0,99997038
698260000	0,99996665	0,99996102	0,99996946
698310000	0,99988794	0,99986409	0,99994324
698360000	0,99997677	0,99999229	0,99996617
698410000	0,99995289	0,99997901	0,99997396
698460000	0,99997329	0,9999751	0,99998729
698510000	0,9999521	0,99999097	0,99998717
698560000	0,99998541	0,99999246	0,99996746
698610000	0,9999925	0,99999092	0,99999513
698660000	0,99999725	0,99998186	0,9999889
698710000	0,99999524	0,99998625	0,99998873
698760000	0,99999583	0,99999464	0,99999308

698810000	0,99999587	0,99999207	0,99999459
698860000	0,9999773	0,99999509	0,99999589
698910000	0,99992989	0,99998417	0,99997835
698960000	0,99998211	0,99999069	0,99997909
699010000	0,99999401	0,99999841	0,99999868
699060000	0,99999705	0,9999927	0,99999414

Tabla 10 Correlaciones Banda Completa del Dividendo Digital a 50KHz

Fuente: Propia

Frecuencia	C1 vs C2	C1 Vs C3
698000000	0,99998106	0,99999774
698010000	0,99999706	0,99999568
698020000	0,99998903	0,99999445
698030000	0,99999879	0,99998945
698040000	0,99997488	0,99996929
698050000	0,99998996	0,99999575
698060000	0,99999365	0,99999479
698070000	0,99997757	0,9999942
698080000	0,99999777	0,99999232
698090000	0,99999114	0,99999804
698100000	0,99998928	0,99999353
698110000	0,99998874	0,99999417
698120000	0,99999745	0,99999611
698130000	0,99999735	0,99998658
698140000	0,99999221	0,99999526
698150000	0,99999554	0,99999611
698160000	0,99998269	0,99998353
698170000	0,99999835	0,99999678
698180000	0,99999648	0,99999255
698190000	0,99999832	0,99999445
698200000	0,99999515	0,99998684

Tabla 11 Correlaciones de primeros 20MHz de la Banda del Dividendo Digital a 10KHz

Fuente: Propia

A continuación se realizó un análisis estadístico de los valores obtenidos en las correlaciones la banda completa de Dividendo Digital y los primero 20MHz de la banda del Dividendo Digital de Media, Desviación Estándar y Varianza.

	C1vsC2	C1vsC3	C1vsC4
Media	0.9993	0.9993	0.9993
Desviación	0.0067	0.0068	0.0066
Varianza	4,46E-01	4,66E-01	4,34E-01

Tabla 12 Resultados estadísticos de las correlaciones de la Banda Completa del Dividendo Digital

	C1 vs C2	C1 Vs C3
Media	0,99951729	0,99945741
Desviación	0,00556171	0,00616948
Varianza	3,09E-05	3,81E-05

Tabla 13 Resultados estadísticos de las correlaciones de los primeros 20MHz de la Banda del Dividendo Digital

Por medio de estos datos se realizó una gráfica de varianza por muestra que permitió el análisis de los cambios dentro de las matrices de correlación teniendo en cuenta la fórmula de desviación estándar:

$$\alpha^2 = (xi - \bar{x})^2 \quad (37)$$

Las gráficas de la varianza de las correlaciones de la banda Completa del dividendo se muestran a continuación en la Figura 81, la Figura 82 y la Figura 83.

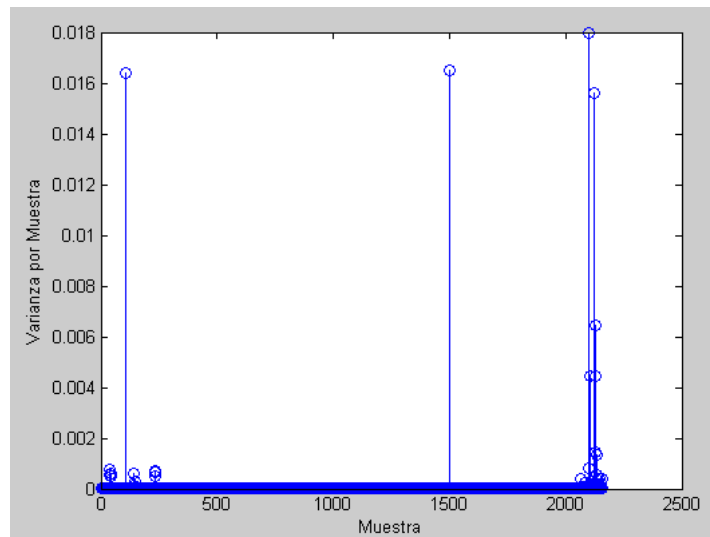


Figura 81 Resultado de la variación de la correlación 1 de la banda Completa del dividendo digital

Fuente: Propia

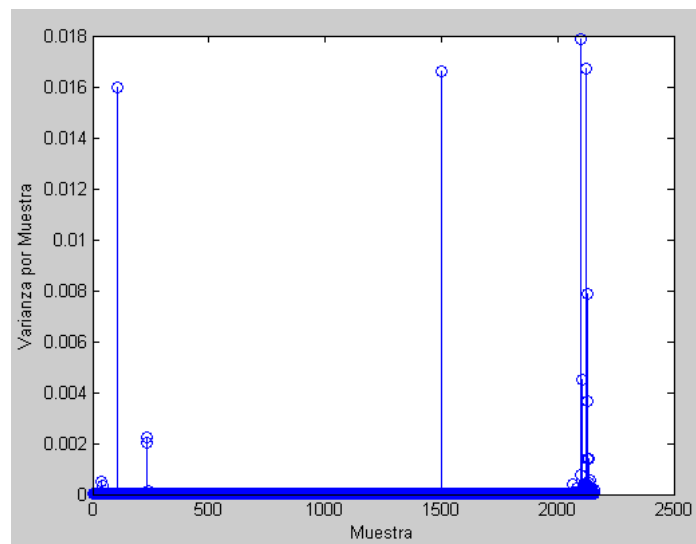


Figura 82 Resultado de la variación de la correlación 2 de la banda Completa del dividendo digital

Fuente: Propia

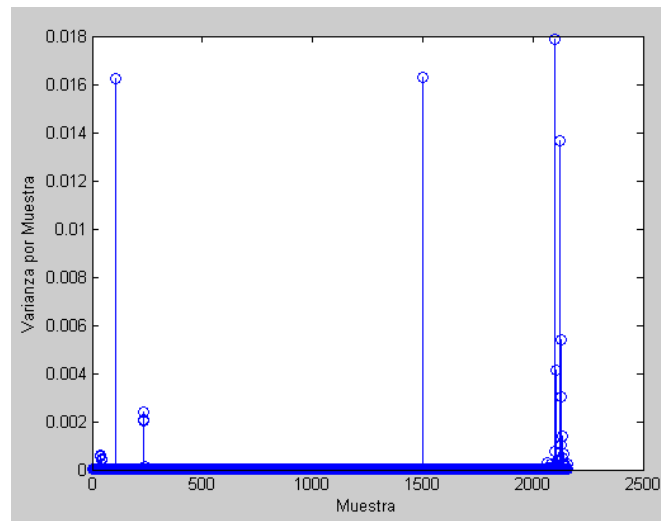


Figura 83 Resultado de la variación de la correlación 3 de la banda Completa del dividendo digital

Fuente: Propia

Las gráficas de la varianza de las correlaciones de los primeros 20MHz de la banda del dividendo se muestran a continuación en la Figura 84 y la Figura 85.

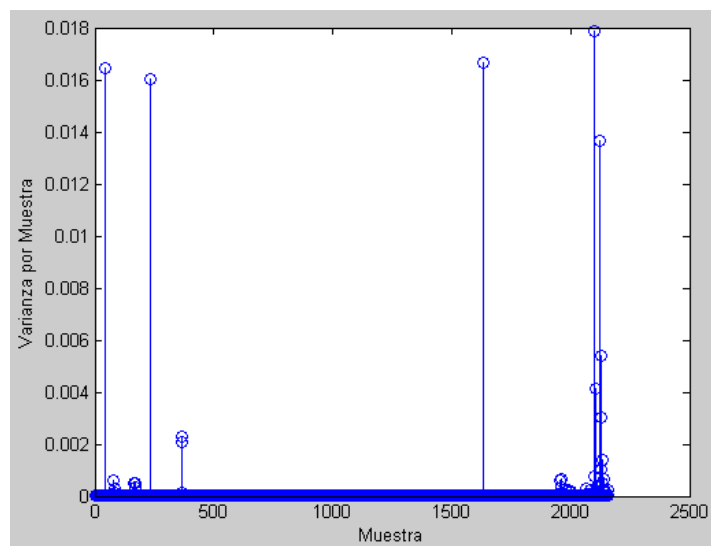


Figura 84 Resultado de la variación de la correlación 1 de los primeros 20MHz de la banda del dividendo digital

Fuente: Propia

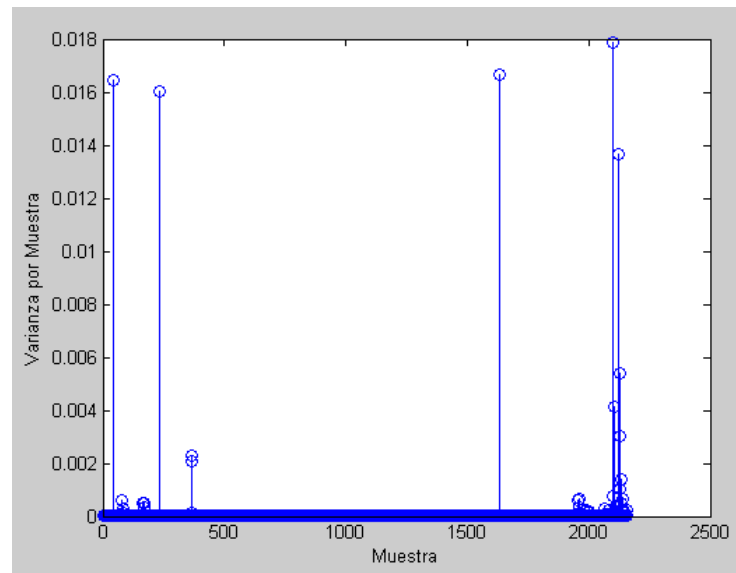


Figura 85 Resultado de la variación de la correlación 2 de los primeros 20MHz de la banda del dividendo digital

Fuente: Propia

Como se muestra en las gráficas de la variación las correlaciones no son altamente ciclo estacionarias debido a que es muy poca la variación que tienen en el tiempo.

6. RESULTADOS

Con el fin de proporcionar una técnica de detección espectral que permita la caracterización y el análisis de la banda del dividendo digital se aplicó cada uno de los modelos mencionados anteriormente en dos capturas realizadas.

En primer lugar se capturó un barrido a 100KHz de la banda completa del Dividendo Digital, debido a que la banda del dividendo digital está en proceso de transición las portadoras que se evidenciaron anteriormente ya no se encontraron, lo que permitió generar un ruido gaussiano que pudiese caracterizar a la banda del dividendo Digital por medio del promedio de la desviación estándar y el promedio de la varianza.

También se tuvo en cuenta el coeficiente de interpolación debido a que en el momento de la captura el equipo de SDR realiza un diezmado en frecuencia lo que ocasiona una disminución en la frecuencia de muestreo y genera una pérdida de información. Debido a esto se realizó un modelo de interpolación para de esta forma recuperar información perdida y tener una media más exacta para el análisis de densidad y correlación espectral.

Una vez realizado estos procesos se calculó la densidad espectral de la señal obtenida para que pudiese ser correlacionada junto con el ruido gaussiano creado anteriormente. En la Tabla 14 se observan las correlaciones de Ruido Gaussiano vs la señal obtenida.

Frecuencia	Ruido Gaussiano vs Señal
698000000	0,999990574
698100000	0,99998747
698200000	0,999987936
698300000	0,999990614
698400000	0,999988926
698500000	0,999990329
698600000	0,999990605
698700000	0,99995726
698800000	0,999977687
698900000	0,999991543
699000000	0,99999153
699100000	0,999990588
699200000	0,999990006
699300000	0,999991192
699400000	0,999988203
699500000	0,999990507

699600000	0,999988803
699700000	0,999991322
699800000	0,999990837
699900000	0,999991033

Tabla 14 Correlaciones Banda Dividendo Digital a 100KHz

Como se evidencia en la Tabla 14 la correlación entre el ruido gaussiano y la señal obtenida se aproxima a uno lo que indica su alta correlación.

A continuación en la Tabla 15 se realizó un análisis estadístico de los valores obtenidos en la correlación de Ruido Gaussiano Vs Señal de la banda del Dividendo Digital a 100KHz de la Media, Desviación Estándar y Varianza.

	Ruido Gaussiano vs Señal
Media	0,999980794
Variación	5,38E-05
Varianza	2,89E-09

Tabla 15 Resultados estadísticos de las correlaciones entre Ruido Gaussiano vs de Señal la Banda del Dividendo Digital

Por medio de estos datos se realizó una gráfica de varianza por muestra que permitió el análisis de los cambios dentro de las matrices de correlación como se ve en la Figura 86

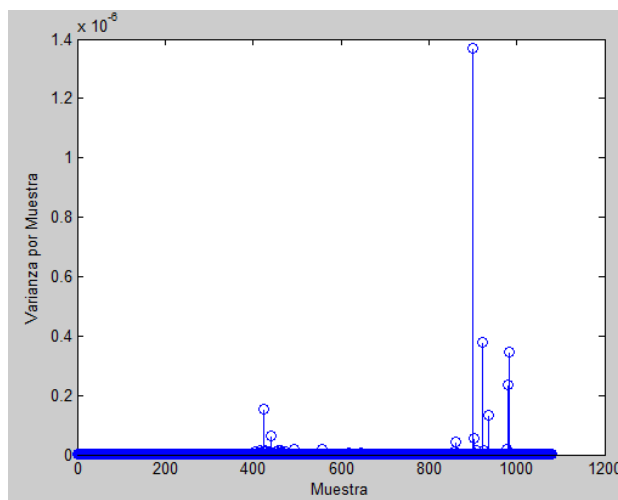


Figura 86 Resultado de la variación de la entre Ruido Gaussiano vs de Señal la Banda del Dividendo Digital
Fuente: Propia

La segunda captura fue un barrido a 1MHz en la banda del Dividendo Digital, que tuvo un proceso similar al anterior.

A continuación se realizó un análisis de la densidad espectral promedio en la banda del dividendo digital a 1MHz para determinar sus componentes espectrales como se observa en la Figura 87.

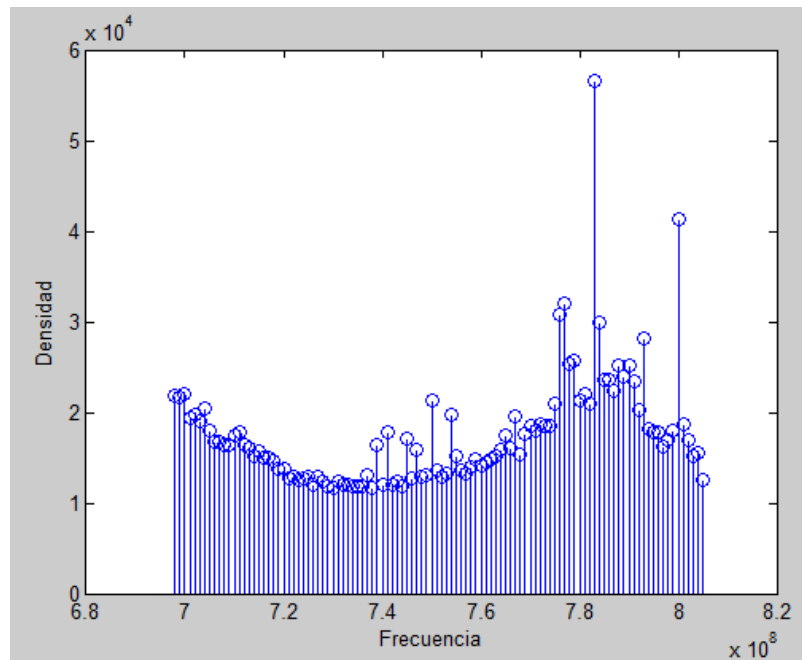


Figura 87 Densidad Espectral Promedio de la Banda del Dividendo Digital a 1Mhz

Fuente: Propia

De esta forma una vez capturados los datos se realizó el proceso de correlación respecto al ruido Gaussiano para cada una de las capturas realizadas obteniendo los datos de la Tabla 16.

Frecuencia	Correlación 1	Correlación 2
698000000	0,999982012	0,999982621
699000000	0,999980797	0,99997962
700000000	0,999983353	0,999984512
701000000	0,999983532	0,999983853
702000000	0,999980111	0,99998063
703000000	0,999983188	0,999982797

704000000	0,999982481	0,999984066
705000000	0,999983014	0,999908783
706000000	0,999984195	0,999979763
707000000	0,999977164	0,999977828
708000000	0,999982811	0,999981037
709000000	0,999982486	0,999969238
710000000	0,99998333	0,99997934
711000000	0,99998205	0,999981846
712000000	0,999982664	0,999972605
713000000	0,999982816	0,999978295
714000000	0,999984231	0,999968886
715000000	0,999983601	0,999983266
716000000	0,999982737	0,999982319
717000000	0,999982576	0,999984373
718000000	0,999982521	0,999982581
719000000	0,999983355	0,999979104

Tabla 16 Correlaciones Ruido Gaussiano vs Señal de la Banda Dividendo Digital a 1MHz

Como se evidencia en la Tabla 16 al relacionar el Ruido Gaussiano vs la señal obtenida se genera una alta correlación lo que implica una similitud entre estas.

A continuación se realizó el proceso del análisis estadístico de los valores obtenidos en la correlación de Ruido Gaussiano Vs Señal de la banda del Dividendo Digital a 1MHz de la Media, Desviación Estándar y Varianza localizados en la Tabla 17 .

	Correlación 1	Correlación 2
Media	0,999957824	0,999792527
Desviación	0,000186355	0,001596358
Varianza	3,47E-08	2,55E-06

Tabla 17 Resultados estadísticos de las correlaciones entre Ruido Gaussiano vs de Señal la Banda del Dividendo Digital a 1MHz

Por último se realizó las gráficas de varianza correspondientes a cada correlación realizada que permitió el análisis de los cambios dentro de las matrices de correlación que se observa en la Figura 88 Y Figura 89.

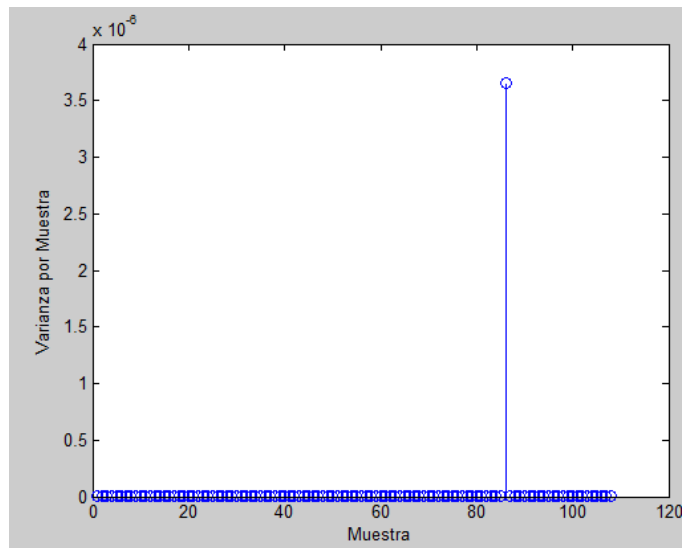


Figura 88 Resultado de la variación de la correlación 1 de la Banda del Dividendo Digital a 1Mhz

Fuente: Propia

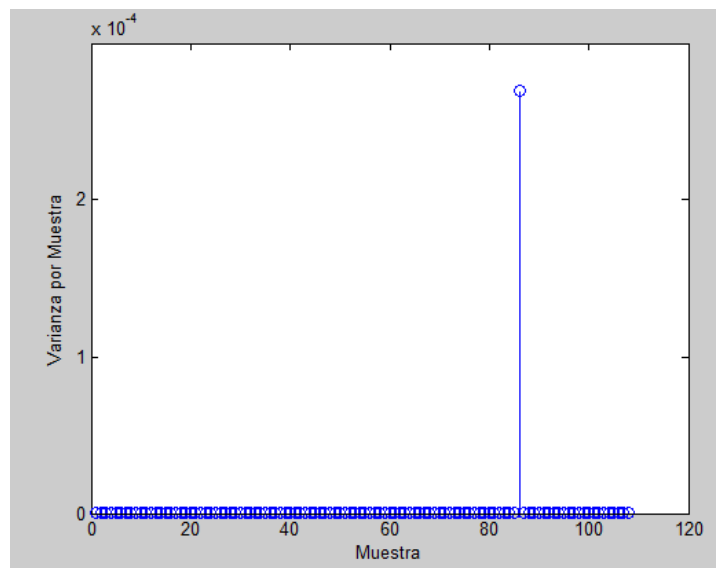


Figura 89 Resultado de la variación de la correlación 2 de la Banda del Dividendo Digital a 1Mhz

Fuente: Propia

7. CONCLUSIONES

Como resultado del proceso de detección espectral se puede concluir que los métodos de densidad espectral y correlación espectral utilizando Radio Definido por Software permitieron caracterizar la banda del dividendo Digital, lo que podría conllevar a la identificación de los parámetros establecidos por el ente regulador del espectro en Colombia para garantizar el funcionamiento óptimo de los posibles servicios 4G que utilizarán la banda del dividendo.

El proceso de detección espectral podría permitir una adecuada utilización del espectro radioeléctrico puesto que este recurso es limitado, ya que al identificar los diferentes componentes espectrales permite establecer las frecuencias que se encuentran es desuso y servicios mal ubicados.

Por medio de los sistemas de Radio Definido por software, se hace posible la implementación de aplicaciones tecnológicas, facilitando el procesamiento de información, debido a que permite la reprogramación dentro de su configuración y tarjetas de programación adaptándose a nuevos algoritmos. De esta forma permite el desarrollo de investigaciones futuras respecto a otras bandas del espectro radioeléctrico o evoluciones de esta misma.

Para obtener los resultados esperados de técnicas de correlación para la banda del dividendo digital, se establecieron los modelos desarrollados primero en la banda de FM (88MHz a 108MHz) garantizando de esta manera el funcionamiento adecuado de estos.

Respecto a la Banda del Dividendo Digital se observó la etapa de transición de la televisión análoga a digital, debido a que en el inicio del proyecto se captaron señales pertenecientes a los canales 52 y 54 y al finalizar este proyecto dichos canales ya no se encontraban, esto se debe a que según el plan desarrollado para la migración de canales en la banda del dividendo entre los años 2013 – 2015 los canales que hacían uso de la banda del dividendo digital tenían que liberar esta banda y migrar hacia otras frecuencias.

Debido a que en el momento de la captura el equipo de SDR realizó un diezmado en frecuencia se ocasionó una disminución en la frecuencia de muestreo y generó pérdidas en la información, fue necesario hacer un modelo de interpolación para de esta forma recuperar información perdida y tener una media más exacta para el análisis de densidad y correlación espectral.

Respecto al resultado de las funciones estadísticas presentadas, se puede observar que dentro de cada una de las correlaciones de las bandas de FM y Dividendo

Digital, el comportamiento probabilístico demostró concordancia debido a que no se presentó mayor varianza, ni desviación estándar.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Plan Vive Digital."
- [2] Center for History and New Media, "Guía rápida." [Online]. Available: http://zotero.org/support/quick_start_guide.
- [3] H. C. Polo, *Redes móviles celulares*. Universidad Santo Tomás, 2009.
- [4] MINTIC, "Proceso de asignación de espectro para la prestación de servicios móviles terrestres."
- [5] Ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones, "resolución 1118 de 2014."
- [6] McLean Foster & Co. en colaboración con and Martin Cave y Robert W. Jones, "Gestión del espectro radioeléctrico." Conjunto de herramientas para la reglamentación de las TIC), Nov-2009.
- [7] Ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones, "Espectro Radioeléctrico."
- [8] "Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia Gráfico."
- [9] Agencia Nacional del Espectro (ANE)), "Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia 2014."
- [10] J. D. Oviedo Arango and M. del R. Guerra de la Espriella, *De las telecomunicaciones a las TIC: Ley de TIC de Colombia (L1341*. CEPAL, 2011.
- [11] C. P. de Competitividad Colombia, "Informe nacional de competitividad 2010-2011," vol. 10, 2010.
- [12] D. N. de Planeación, *Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014*. Imprenta Nacional de Colombia, 2011.
- [13] M. Novick, S. Rojo, V. Castillo, G. Breard, and L. Turnini, "Nuevas actividades económicas surgidas a partir del paradigma TIC: el sector del software y los servicios de call center," 2011.
- [14] R. C. Reinhart, S. K. Johnson, T. J. Kacpura, C. S. Hall, C. R. Smith, and J. Liebetreu, "Open Architecture Standard for NASA's Software-Defined Space Telecommunications Radio Systems," vol. 95, no. 10, pp. 1986–1993, 2007.
- [15] R. C. Reinhart, S. K. Johnson, T. J. Kacpura, C. S. Hall, C. R. Smith, and J. Liebetreu, "Open Architecture Standard for NASA's Software-Defined Space Telecommunications Radio Systems," vol. 95, no. 10, pp. 1986–1993, 2007.
- [16] P. Murphy, A. Sabharwal, and B. Aazhang, "DESIGN OF WARP: A WIRELESS OPEN-ACCESS RESEARCH PLATFORM."
- [17] Ing. Alexander Galvis Quintero, Christian A. Ceballos Betancour, and Lukas De Sanctis Gil, "SDR: La alternativa para la evolución inalámbrica a nivel físico," Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- [18] D. García Gómez, J. M. Riera Salis, and P. García del Pino, "Implementación y configuración de un receptor de radio definido por software (SDR) para estudios de propagación," 2012.
- [19] M. Quiñones, J. P. Tene, K. Rohoden, C. Carrión, and others, "Sistema de conmutación y control de llamadas basado en OpenBTS y Asterisk," 2014.

- [20] J. de J. R. Uribe, T. M. Bojacá, and C. H. C. Sánchez, "Caracterización de la plataforma de radio definido por software USRP N210-WBX," *Rev. GTI*, vol. 12, no. 34, 2014.
- [21] M. Ettus, *Ettus research*. 2012.
- [22] Ettus Research and National Instruments Company, "BasicTX Daughterboard 1-250 MHz Rx," 2014.
- [23] Ettus Research and National Instruments Company, "BasicRX Daughterboard 1-250 MHz Tx," 2014.
- [24] M. T. G. Leiva, "La política europea del espectro radioeléctrico," in *I+ C Investigar a comunicación [Recurso electrónico]: Invetigar la comunicación= Invetigar la comunicació= Komunikazio-lkerketa: Actas y memoria final: Congreso Internacional Fundacional AE-IC, Santiago de Compostela, 30, 31 de enero y 1 de febrero de 2008*, 2008, p. 20.
- [25] Ministerio de Industria, energía y turismo. Gobierno de España, *¿Qué es el dividiendo digital?* 2010.
- [26] Oscar Giovanni León Suárez, "El Desafío De La Universalización De La Banda Ancha y Las Oportunidades De La Banda De 700 MHZ." Agencia Nacional Del Espectro, Nov-2010.
- [27] M. T. García Leiva, "El dividendo digital: desafíos, oportunidades y posiciones nacionales," 2009.
- [28] Agencia nacional Del Espectro, "Cuadro Nacional De Atribución de Bandas de Frecuencia." 2014.
- [29] J. A. Carreño Cardona, "ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TDT EN COLOMBIA," Bogotá, 28-Oct-2009.
- [30] A. N. de T. ANTV, "Televisión Digital Terrestre."
- [31] H. Sira-Ramírez, R. Marquez, F. Rivas-Echevarría, and O. Llanes-Santiago, *Control de sistemas no lineales: linealización aproximada, extendida, exacta*. Pearson Prentice Hall, 2005.
- [32] E. B. Albertí, *Procesado digital de señales-II: Fundamentos para comunicaciones y control*, vol. 170. Univ. Politèc. de Catalunya, 2006.
- [33] J. Briceño, "Principios de las Comunicaciones," 2005.
- [34] E. S. Olivas, *Tratamiento digital de señales: problemas y ejercicios resueltos*. Pearson Educación, 2003.
- [35] E. B. Albertí, *Procesado digital de señales-II: Fundamentos para comunicaciones y control*, vol. 170. Univ. Politèc. de Catalunya, 2006.
- [36] M. J. Roberts, G. N. Cazares, and G. M. Hernández, *Señales y sistemas: análisis mediante métodos de transformada y Matlab*. McGraw-Hill, 2005.
- [37] B. Márquez and E. José, *Principios de las Comunicaciones*. Venezuela, 2000.
- [38] L. E. Franks, *Teoría de la señal*. Reverté, 1975.
- [39] M. B. Velasco, F. C. Roldán, R. J. Martínez, and J. S. Landete, *Problemas de tratamiento digital de señales*. Servicio de Publicaciones, 2013.
- [40] M. Martinez, L. Gomez, A. J. Serrano, and J. Gomez, "Modificación de la frecuencia de muestreo.," 2010 2009.

- [41] J. de J. R. Uribe, T. M. Bojacá, and C. H. C. Sánchez, "Caracterización de la plataforma de radio definido por software USRP N210-WBX," *Rev. GTI*, vol. 12, no. 34, 2014.
- [42] A. A. Tabassam, F. A. Ali, S. Kalsait, and M. U. Suleman, "Building Software-Defined Radios in MATLAB Simulink-A Step Towards Cognitive Radios," in *Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2011 UKSim 13th International Conference on*, 2011, pp. 492–497.
- [43] "USRP® Support from Communications System Toolbox."
- [44] M. A. Heras Sánchez, "Contribución de las técnicas de procesamiento digital de señales en el diseño de filtros digitales," 2013.