



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN
“MEDICIÓN, CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO DEL
RANGO DE FRECUENCIAS ASIGNADO A RADIOFUSIÓN POR
TV (512 – 698 MHz) DE LA BANDA UHF DEL ESPECTRO
ELECTROMAGNÉTICO EN LA FIEC, CAMPUS PROSPERINA”

TESINA DE SEMINARIO

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Presentado por:

Israel Benjamín Ruiz Quinde

Randhi Ramsés Malta Bautista

GUAYAQUIL-ECUADOR

AÑO 2015

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios ante todo, a mis padres, Guido y Graciela, y a mis hermanos Grace y Guido Jr. por el apoyo constante durante mi formación académica y profesional.

Israel Ruiz Quinde

Agradezco a mis padres Jorge y Cecibel y a toda mi familia por todo el apoyo brindado durante mi formación académica y personal, a mis compañeros de universidad y trabajo quienes han influido en mi para mejor como persona cada día.

Randhi Malta Bautista

DEDICATORIA

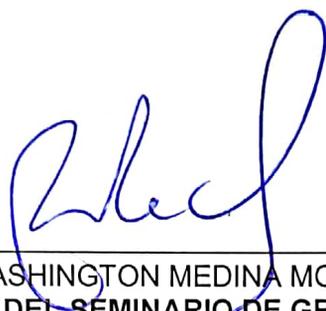
Dedico éste trabajo a Dios, a mi familia, y a los docentes que con sus enseñanzas motivaron al desarrollo de este documento.

Israel Ruiz Quinde

Dedico el presente trabajo a mi familia y docentes quienes con su constante presencia y enseñanza permitieron la culminación del mismo.

Randhi Malta Bautista

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



MG. WASHINGTON MEDINA MOREIRA
PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN



PHD. FRANCISCO NOXILLO PARALES
PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesina nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de graduación de la ESPOL)



ISRAEL BENJAMÍN RUIZ QUINDE



RANDHI RAMSÉS MALTA BAUTISTA

RESUMEN

En el presente documento se realiza un estudio acerca de la ocupación del espectro radioeléctrico en la FIEC en el rango de frecuencias de 512 a 698 MHz correspondiente a la banda UHF y asignado al servicio de radiodifusión de televisión abierta, en el cual se describe el proceso de coleccionar y analizar mediciones realizadas del espectro durante siete días para conocer el comportamiento de la ocupación del mismo y de esta manera establecer un modelo estadístico que nos permita inferir acerca de la disponibilidad futura del segmento de frecuencias antes mencionado haciendo frente a la actual problemática que existe acerca del agotamiento de canales de frecuencia y uso ineficiente del espectro.

Las mediciones del espectro fueron obtenidas con ayuda de la antena omnidireccional Sirio SD 2000U y el analizador RF Agilent E4404B del laboratorio de telecomunicaciones de la FIEC. Luego fueron almacenadas y organizadas en un documento de Excel con la ayuda de la herramienta Intuilink y Macros respectivamente.

El método de detección de energía fue empleado para el análisis de los datos, en el cual se comparan los niveles de potencia de la señal receptada con un umbral de decisión o treshold y de esta forma se determina si un canal se encuentra o no ocupado por un usuario primario o concesionario legal de dicho canal. El treshold de decisión fue establecido considerando la fórmula del ruido térmico equivalente a la entrada del analizador de espectros ligado al ancho de banda en el cual se realiza la medición y un margen de potencia recomendado por la ITU para éste análisis.

Para tener una mejor perspectiva acerca de la ocupación del espectro, se realizaron gráficos en MATLAB relacionando tres variables de interés de la señal sensada: frecuencia, tiempo y potencia, además se gráfica la ocupación porcentual o también llamada duty cycle de cada canal de televisión de la banda UHF obtenida durante los siete días en que se realizaron las mediciones.

Finalmente se comprueba que la ocupación del espectro radioeléctrico puede ser modelada mediante una cadena de Markov, la cual permitió determinar la probabilidad del estado futuro de un canal, es decir que se encuentre ocupado o desocupado en un determinado instante de tiempo, según las

mediciones anteriormente realizadas y conociendo el estado presente del mismo.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE TABLAS	XXII
INTRODUCCIÓN	XXIII
CAPÍTULO 1	1
ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 OBJETIVOS GENERALES.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	6
1.5 OBSERVACIONES.....	7
1.6 LIMITACIONES.....	7
1.7 METODOLOGÍA	8
CAPÍTULO 2.....	10
MARCO TEÓRICO	10
2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	10
2.1.1 ESPECTRO RADIOELÉCTRICO	12
2.1.2 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS.....	15
2.1.2.1 EFECTOS DEL MEDIO Y PARÁMETROS DE PROPAGACIÓN	18
2.1.2.2 POLARIZACIÓN DE LAS ONDAS DE RADIO.....	20
2.1.3 ENLACES DE RADIO	22
2.1.3.1 PÉRDIDA EN ESPACIO LIBRE	24
2.1.3.2 POTENCIA IRRADIADA EQUIVALENTE (PIE)	27
2.1.3.3 PÉRDIDAS TOTALES EN UN RADIOENLACE.....	30
2.1.3.4 RUIDO TÉRMICO	32
2.2 BANDA UHF DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	33
2.3 TELEVISIÓN ANALÓGICA	35

2.3.1 TELEVISIÓN	35
2.3.2 MODULACIÓN DE VIDEO	35
2.3.3 MODULACIÓN DE AUDIO	36
2.3.4 LUMINANCIA	36
2.3.5 CROMINANCIA	37
2.3.6 ESTÁNDARES DE SISTEMAS DE TELEVISIÓN ANALÓGICA ...	37
2.3.7 SEÑAL DE VIDEO ANALÓGICA.....	38
2.3.8 TELEVISIÓN A COLOR	38
2.4 SISTEMAS DE TELEVISIÓN DIGITAL TERRESTRE TDT	41
2.4.1 VIDEO DIGITAL	42
2.4.2 ESTÁNDARES PARA LA TDT	42
2.4.2.1 ATSC.....	42
2.4.2.2 DVB.....	44
2.4.2.3 ISDBT.....	45
2.4.2.4 SBTVD	45
2.5 SISTEMA DE TV EN EL ECUADOR	47
2.5.1 CUADRO DE ATRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS PARA LA BANDA DE 512MHZ A 698MHZ.....	47

2.5.2 NORMAS TÉCNICAS PARA LA TRANSMISIÓN DE TV EN EL ECUADOR.....	50
2.5.2.1 INTENSIDAD DE CAMPO MÍNIMA A PROTEGER	50
2.5.3 ESTÁNDARES PARA TRANSMISIÓN DE TV EN ECUADOR	52
2.5.4 CANALIZACIÓN DE LA BANDA DE 512 MHZ A 698 MHZ.....	54
2.5.5 FRECUENCIAS CONCESIONADAS EN LA BANDA TV UHF PROVINCIA GUAYAS.....	57
2.6 SISTEMAS DE ACCESO DINÁMICO AL ESPECTRO, SDA (SPECTRUM DYNAMIC ACCESS)	60
2.7 PROCESOS DE MARKOV	62
2.7.1 CADENAS DE MARKOV FINITAS	63
2.7.2 MATRIZ DE TRANSICIÓN	64
2.7.3 VECTOR DE PROBABILIDADES INICIALES	64
CAPÍTULO 3.....	66
SISTEMA DE MEDICIÓN EMPLEADO PARA SENSAR LAS ONDAS DE RADIO	66
3.1 CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR DE MEDICIÓN, AMBIENTE DE RADIO.	66
3.2 ELEMENTOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DEL ESPECTRO	67

3.2.1 ANTENA RECEPTORA SIRIO SD 2000U.....	68
3.2.2 ANALIZADOR DE ESPECTRO AGILENT E4404B	69
3.2.3 SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS RECEPTADOS	72
3.3 MÉTODO DE MEDICIÓN EMPLEADO.....	73
3.4 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	76
3.4.1 PROBABILIDAD DE DETECCIÓN, PROBABILIDAD DE FALSA ALARMA.....	78
3.4.2 HISTOGRAMA DE LAS MEDICIONES DE POTENCIA.....	80
3.4.3 ELECCIÓN DEL TRESHOLD.....	81
CAPÍTULO 4.....	83
CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO DE LA OCUPACIÓN DEL ESPECTRO	83
4.1 DETERMINACIÓN DEL CICLO DE TRABAJO.....	84
4.2 ANÁLISIS DE OCUPACIÓN DEL ESPECTRO.....	85
4.3 MODELO DE LA OCUPACIÓN DEL ESPECTRO.....	101
4.3.1 MODELO MARKOVIANO DE LA OCUPACIÓN DE LA BANDA UHF (512 A 698 MHZ).....	102
CONCLUSIONES	111

RECOMENDACIONES.....	114
BIBLIOGRAFÍA.....	117

ABREVIATURAS

AM	Modulación de Amplitud
AVI	Audio video Interleave
ATSC	Advanced Television Systems Committee
CONATEL	Comisión Nacional de Telecomunicaciones
DVB	Digital Video Broadcasting
FIEC	Facultada de Ingeniería en Electrónica y Computación
FM	Modulación de Frecuencia
FSL	Free Space Loss
GHz	Giga Hertz
GSM	Global System for Mobile Communications
HDTV	High Definition Television
ISDBT	Integrated Services Digital Broadcasting Television
KHz	Kilo Hertz
MHz	Mega Hertz
MPEG	Moving Picture Experts Group

NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio
NTSC	National Television System Committee
NF	Noise Figure
OFDM	Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales
PAL	Phase Alternation Line
PIE	Potencia Irradiada Equivalente
PNF	Plan Nacional de Frecuencias
QAM	Modulación de Amplitud en Cuadratura
RF	Radiofrecuencia
SBTVD	Sistema Brasileño de Televisión Digital
SDA	Spectrum Dynamic Access
SDTV	standard-definition television
SECAM	Séquentiel Couleur à Mémoire
SNR	Relación señal/ruido
TDT	Televisión Digital Terrestre
THF	Tremendous High Frequency

TV	Televisión
UHF	Ultra High Frequency
UIT/ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
VLF	Very Low Frequency
VHF	Very High Frequency
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. División del espectro electromagnético.	12
Figura 2.2. Longitud de onda de la radiación electromagnética.....	16
Figura 2.3 Enlaces de radio	22
Figura 2.4 Distribución global de Estándares para TV analógica	38
Figura 2.5 Señal de Luminancia, escala de grises	39
Figura 2.6 Modulación de Señal Y	40
Figura 2.7 Señal analógica de TV blanco y negro vs TV a color	41
Figura 2.8 Modelamiento ATSC	43
Figura 2.9 Modelamiento DVB	44
Figura 2.10 Modelamiento SBTVD	46
Figura 2.11 Distribución global de estándares TDT	46
Figura 2.12 Señal TV analógica estándar NTSC	53
Figura 2.13 Señal TV digital estándar ISDBT-b o SBTVD.	54
Figura 2.14 Espacios disponibles del espectro radioeléctrico.....	62
Figura 3.1 Lugar de medición, FIEC-ESPOL.	67
Figura 3.2 Antena Sirio SD 2000U FIEC Campus Prosperina	68

Figura 3.3 Analizador de Espectro Agilent E4404BLaboratorio de Telecomunicaciones FIEC	69
Figura 3.4 Figura de Ruido Agilent E4404B.....	70
Figura 3.5 Software Intuilink	72
Figura 3.6. Distribución de probabilidades de las mediciones realizadas.	80
Figura 3.7. Estadísticas descriptivas de las mediciones realizadas.....	81
Figura 4.1 Función de obtención de duty cycle.....	84
Figura 4.2 Utilización del espectro lunes 00:00 a 24:00Frecuencias 512 – 602MHz	87
Figura 4.3 Duty cycle lunes 00:00 a 24:00Frecuencias 512 – 602MHz	88
Figura 4.4 Utilización del espectro lunes 00:00 a 24:00Frecuencias 602 – 698MHz	88
Figura 4.5 Duty cycle lunes 00:00 a 24:00Frecuencias 602– 698MHz	88
Figura 4.6 Utilización del espectro martes 00:00 a 24:00Frecuencias 512 – 602MHz	89
Figura 4.7 Duty cycle martes 00:00 a 24:00Frecuencias 512 – 602MHz.....	89
Figura 4.8 Utilización del espectro martes 00:00 a 24:00Frecuencias 602 – 698MHz	89
Figura 4.9 Duty cycle martes 00:00 a 24:00Frecuencias 602– 698MHz.....	89

Figura 4.10 Utilización del espectro miércoles 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz	90
Figura 4.11 Duty cycle miércoles 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz	90
Figura 4.12 Utilización del espectro miércoles 00:00 a 24:00 Frecuencias 602 – 698MHz	90
Figura 4.13 Duty cycle miércoles 00:00 a 24:00 Frecuencias 602– 698MHz	91
Figura 4.14 Utilización del espectro jueves 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz	91
Figura 4.15 Duty cycle jueves 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz	91
Figura 4.16 Utilización del espectro jueves 00:00 a 24:00 Frecuencias 602 – 698MHz	91
Figura 4.17 Duty cycle jueves 00:00 a 24:00 Frecuencias 602– 698MHz	92
Figura 4.18 Utilización del espectro viernes 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz	92
Figura 4.19 Duty cycle viernes 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz ...	92
Figura 4.20 Utilización del espectro viernes 00:00 a 24:00 Frecuencias 602 – 698MHz	92
Figura 4.21 Duty cycle viernes 00:00 a 24:00 Frecuencias 602– 698MHz	93

Figura 4.22 Utilización del espectro sábado 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz	93
Figura 4.23 Duty cycle sábado 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz ...	93
Figura 4.24 Utilización del espectro sábado 00:00 a 24:00 Frecuencias 602 – 698MHz	93
Figura 4.25 Duty cycle sábado 00:00 a 24:00 Frecuencias 602– 698MHz	94
Figura 4.26 Utilización del espectro domingo 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz	94
Figura 4.27 Duty cycle domingo 00:00 a 24:00 Frecuencias 512– 602MHz .	94
Figura 4.28 Utilización del espectro domingo 00:00 a 24:00 Frecuencias 602 – 698MHz	94
Figura 4.29 Duty cycle domingo 00:00 a 24:00 Frecuencias 602– 698MHz ..	95
Figura 4.30 Porcentaje de uso por canal Lunes	97
Figura 4.31 Porcentaje de uso por canal Martes	98
Figura 4.32 Porcentaje de uso por canal Miércoles	98
Figura 4.33 Porcentaje de uso por canal Jueves	99
Figura 4.34 Porcentaje de uso por canal Viernes	99
Figura 4.35 Porcentaje de uso por canal Sábado	100
Figura 4.36 Porcentaje de uso por canal Domingo	100

Figura 4.37. Diagrama de transición de estado de Markov.....	104
Figura 4.38. Vector de probabilidades de estado inicial canal 31	106
Figura 4.39. Probabilidad de transición del estado ocupado al estado ocupado del canal 31.....	107
Figura 4.40 Probabilidad de transición del estado desocupado al estado desocupado del canal 31	107
Figura 4.41 Probabilidad de transición del estado desocupado al estado ocupado del canal 31	108
Figura 4.42 Probabilidad de transición del estado ocupado al estado desocupado del canal 48.....	108
Figura 4.43 Probabilidad de estado siguiente del canal 31.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. División y nomenclatura de las bandas de frecuencia para la radiodifusión.....	15
Tabla 2.2. División y nomenclatura de las bandas de frecuencia para las radiocomunicaciones espaciales	15
Tabla 2.3. Clasificación de las ondas electromagnéticas.....	17
Tabla 2.4. Atribución de frecuencias Ecuador.	48
Tabla 2.5 Relaciones de protección para audio y video señal deseada/no deseada.....	50
Tabla 2.6 Relaciones de protección para audio y video señal deseada/no deseada.....	51
Tabla 2.7 Especificaciones estándar NTSC.....	53
Tabla 2.8 Canalización para TV Analógica NTSC	55
Tabla 2.9 Canalización para TV Digital ISDBT-b o SBTVD	56
Tabla 2.10 Concesionarios TV Analógica Guayas.....	57
Tabla 2.11 Concesionarios TV Digital Terrestre Guayas	59

INTRODUCCIÓN

El considerable incremento de la demanda de servicios de comunicación en conjunto con las exigencias de sus usuarios, obligan a mantener en constante mejora la capacidad de las redes de comunicación inalámbrica. En general la capacidad de un servicio de comunicación puede ser mejorada ya sea a nivel de su capa física, adquiriendo un segmento del espectro más amplio o mejorando la arquitectura de la red. [1]

Acceder a una mayor cantidad del espectro radioeléctrico es muy costoso en especial para los operadores de red que empiezan en el negocio de las telecomunicaciones, además del tiempo que tardaría en adquirir el rango de frecuencias por el procedimiento previo que exige el ente regulador. Comúnmente las mejoras de la capacidad del espectro por parte de los operadores son realizadas en la capa física, con el desarrollo e implementación de nuevas técnicas de codificación, modulación, transmisión y recepción de señales, así como de técnicas de acceso múltiple y dinámico al medio electromagnético. [1]

Los sistemas radio cognitivos son ejemplo de un sistema de acceso dinámico al espectro que en la actualidad se están empleando para contrarrestar el inconveniente de la escasez de canales de frecuencia, compartiendo el mismo segmento del espectro entre los operadores de red sin ser todos ellos los concesionarios de dichas frecuencias. El uso de esta tecnología es prometedor en términos de eficiencia del uso del espectro, al poder asignar un segmento de frecuencias a los nuevos inversionistas en el negocio de las telecomunicaciones que requieran de un canal inalámbrico para realizar sus transmisiones, o aumentar la capacidad del servicio que ofrecen los ya existentes. [2]

En los sistemas de transmisión de señales de TV, la utilización del espectro es constante, principalmente en el horario de programación de 06h00 am a 00h00 am, en el cual existe mayor número de televidentes expectantes de la información que se transmite. En el Ecuador en horarios de la madrugada algunos radiodifusores de TV abierta de las bandas de VHF y UHF optan por cesar sus emisiones anulando la portadora de canal debido a la poca teleaudiencia que tienen en dicho horario. Sin embargo la disponibilidad de un determinado segmento del espectro no solo se enfoca en los canales de frecuencia que se encuentran libre de transmisiones sino que también conlleva a analizar los niveles de potencia con los cuales los operadores

llegan a un lugar determinado. Existen zonas en donde la intensidad de la señal receptada es muy baja o casi nula debido a lo lejos que se encuentran de las antenas repetidoras, lo cual es un claro ejemplo de uso ineficiente del espectro y que también puede ser aprovechado por los sistemas de acceso dinámico al espectro. [3]

El objetivo principal es conocer el comportamiento de la ocupación que se le brinda a un determinado segmento del espectro en base a mediciones de potencia realizadas del mismo, para de esta manera poder determinar la factibilidad de utilizar dicho canal sin causar interferencias en su concesionario legal o usuario primario.[2]

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

1.1 Antecedentes y descripción del problema

El desarrollo e implementación de nuevos sistemas de comunicación inalámbrica se ve afectado al conocer que el medio de transporte de los datos u ondas electromagnéticas, distribuidas en rangos de frecuencias, sufren de agotamiento debido a la demanda de los operadores que brindan sus servicios actualmente en ellas. Un artículo del reglamento de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, ITU, cita que: “En la

utilización de bandas de frecuencias para las radiocomunicaciones, los miembros tendrán en cuenta que las frecuencias y las orbitas de los satélites geoestacionarios son recursos naturales limitados que deben utilizarse de forma racional, eficiente y económica” [3], por lo cual los operadores deben limitar el segmento del espectro utilizado al mínimo indispensable.

En el Ecuador, en base a la información presentada por la Superintendencia de Telecomunicaciones, SUPERTEL, respecto a la concesión de frecuencias en el segmento del espectro asignado en gran parte al servicio de radiodifusión por Televisión en la banda UHF (512 a 698 MHz), destaca que dentro de los 30 canales asignados para la distribución de señales de TV terrestre, sólo 6 de ellos se encuentran aún disponibles [3], y su uso estará destinado al servicio de televisión digital que prestarán los actuales concesionarios tanto de la banda UHF como de la banda VHF dedicados a la transmisión de señales de tv analógica.

Particularmente en el campus Prosperina de la ESPOL, la recepción de las señales de televisión abierta no es óptima, debido a la topología del lugar y a lo lejos que se encuentran los repetidores de TV de este sitio,

es por ello que al sintonizar los canales locales en un dispositivo terminal, estos presentan distorsión tanto en audio como en video, impidiendo la visualización de la programación ofrecida con normalidad.

Con lo anteriormente mencionado surge la necesidad de un estudio sobre la eficiencia del uso del segmento del espectro asignado a la radiodifusión de TV en la banda UHF (512 a 698 MHz), el cual será realizado en la FIEC, ESPOL, dónde se procederá a realizar mediciones del espectro para su posterior caracterización y modelamiento de la ocupación que se le está dando al mismo en dichas instalaciones.

1.2 Justificación

Al conocer la disponibilidad del espectro radioeléctrico en un sitio determinado, en base al análisis de las mediciones previamente realizadas, se puede extender el estudio de este proyecto hacia los sistemas de acceso dinámico al espectro, radio cognitivos, los cuales aumentan la eficiencia del uso de los canales de frecuencia, específicamente de los que no se utilizan, que no están siendo utilizados

en un determinado instante, o cuando exista una mala recepción de las señales emitidas.

Particularmente en la FIEC, ESPOL campus Prosperina, la recepción de las señales de Televisión abierta es de mala calidad, lo cual motiva a conocer cuáles son las condiciones del ambiente de radio en este lugar y comprobar mediante este proyecto que es factible aprovechar de una mejor manera el segmento del espectro de 512 a 698 MHz en la banda UHF, ya sea comprobando que existen instantes de tiempo en donde no se tiene ocupación de cierto canal de frecuencia o debido a niveles muy bajos de potencia de las señales receptadas. De esta manera los usuarios sin autorización, siempre y cuando no provoquen interferencia en los canales adyacentes, pueden hacer uso de los que se encuentren disponibles; y si los concesionarios de dichas frecuencias quisieran transmitir su información, los anteriores pudieran utilizar un canal distinto, o en su defecto culminar el proceso si no hubiese alguno disponible.

Con esto se espera aumentar el desarrollo de proyectos de comunicaciones inalámbricas que requieran experimentar con valores reales y no únicamente simulados en las frecuencias que se encuentren

disponibles en el segmento del espectro anteriormente mencionado, con la mínima interferencia posible hacia el concesionario legal del canal, además de conocer valores potencia recibida de una transmisión de televisión analógica y demás parámetros importantes a la hora de realizar los cálculos de un enlace inalámbrico, como lo son la relación señal a ruido, las pérdidas que sufre la señal por el ruido del ambiente y elementos receptores entre otras apreciaciones.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivos generales:

- Medir, caracterizar y modelar el rango de frecuencias asignado a TV, 512-698 MHz de la banda UHF del espectro electromagnético en la FIEC, campus Prosperina.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Conocer los servicios que se ofrecen en el rango de frecuencias de 512-698 MHz de la banda UHF del espectro electromagnético.

- Adquirir conocimientos del funcionamiento del analizador de espectros Agilent HP E4404B y obtener los datos correspondientes al rango de frecuencias a estudiar (512 – 698 MHz) estudiado.
- Analizar los datos obtenidos de las mediciones realizadas del espectro en la FIEC.
- Establecer un modelo estadístico de la ocupación del espectro en el rango de frecuencias de 512-698 MHz de la banda UHF.

1.4 Alcance del proyecto

El siguiente proyecto tiene la finalidad de comprobar la eficiencia del uso del rango de frecuencias asignado a TV 512-698 MHz en la FIEC-ESPOL, Campus Prosperina, posterior a este resultado comprobaremos la factibilidad de establecer una red interna para transmisión de señales en la banda asignada siempre que exista disponibilidad de implementar un sistema de acceso dinámico o en su defecto usar los canales que estuvieran disponibles.

1.5 Observaciones

Para realizar las mediciones espectrales emplearemos la antena receptora SIRIO SD 2000U ubicada en las instalaciones de la FIEC, así como el analizador de espectros Agilent HP E4404B del laboratorio de telecomunicaciones.

Las mediciones del espectro no alteran el funcionamiento de los sistemas de comunicación, al contrario permiten conocer las características del servicio que brindan los operadores en base a la eficiencia del uso de los canales de frecuencias que tienen concesionado

1.6 Limitaciones

El lugar donde se realizará el estudio es un área rodeada por densa vegetación de altura considerable, lo que producirá que las señales de estudio varíen en comparación con una zona abierta, por lo tanto los resultados obtenidos serán válidos para el lugar de estudio mencionado bajo las mismas condiciones. Para poder analizar la eficiencia del uso del espectro de una manera global sería necesario realizar varias mediciones en diferentes zonas y condiciones distintas.

Se deberá realizar las mediciones durante las 24 horas del día debido a que es conocido que la programación de los canales de televisión varía según el horario y serán muestreadas en un corto periodo de tiempo por lo que los resultados obtenidos deberán ser validados conjuntamente con los proyectos de transmisión de la programación de los canales involucrados, los contratos de concesión de los mismos y la transición de televisión analógica a digital.

1.7 Metodología

El proyecto se ha dividido en tres etapas principales. La primera etapa constituye realizar las mediciones de potencia en un segmento del espectro radioeléctrico en la banda UHF, para lo cual disponemos de una antena receptora y un analizador de espectros con interfaz para la conexión de una PC y su respectivo software para la adquisición de los datos obtenidos. Ambos dispositivos se encuentran a nuestra disposición en el laboratorio de Telecomunicaciones de la FIEC.

La segunda etapa incluye el análisis de los datos, el procesamiento de la información obtenida de las mediciones previamente realizadas,

determinando de esta manera los principales parámetros en los que nos basaremos para establecer conclusiones acerca de la eficiencia del uso del espectro, como lo son: el umbral de potencia que indicará si un canal de frecuencia está siendo utilizado o se encuentra libre y el ciclo de trabajo de un canal de radio que nos permitirá conocer la disponibilidad del mismo en función del tiempo.

Por último, la tercera etapa consiste en el desarrollo de un modelo estadístico cuya variable principal será la ocupación del espectro en el rango de frecuencias de 512 a 698 MHz en la FIEC, con lo que se automatiza el proceso de búsqueda de canales de frecuencia libres, base principal de los sistemas de acceso dinámico al espectro. Las mediciones se realizarán en varios horarios y en distintos días para poder determinar si el comportamiento de la ocupación de los canales de radio es dependiente del tiempo, y de ser así el modelo a plantear será de tipo estocástico.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Espectro Electromagnético

La energía electromagnética viaja a través de ondas y abarca un amplio segmento, desde longitudes de ondas muy grandes a las más diminutas como los rayos gamma. El ojo humano puede sólo detectar una pequeña porción del espectro, también conocido como luz visible. Cada segmento del espectro es empleado para un determinado uso y se debe de tener un dispositivo adecuado para receptor y entender la información que se

está emitiendo. En el caso particular de la NASA que realiza constantes estudios de nuestro planeta, el sistema solar y el resto del universo, tiene a disposición el rango entero del espectro electromagnético sin causar interferencia con los sistemas de comunicación terrestre. [5]

El espectro electromagnético es un conjunto de ondas electromagnéticas presentadas en frecuencias desde los 3KHz a los 3000GHz las cuales se pueden propagar en el espacio sin necesidad de un medio físico y permiten brindar una variedad de servicios de telecomunicaciones como lo son transmisiones AM, FM, Televisión, entre otras.[5]

La radiación electromagnética es el medio principal para muchas de nuestras interacciones con el mundo: la luz permite divisar los objetos; las ondas de radio hacen posible las transmisiones de radio y TV; microondas son usadas en los radares de comunicación; los rayos X permiten conocer el estado de la estructura ósea y por ende su estudio; y los rayos gamma usados en la astronomía y la exploración del universo. [6]

Todos estos diferentes tipos de radiación electromagnética difieren en una sola propiedad, su longitud de onda. El espectro electromagnético está dividido en cinco principales tipos de radiación. Como se muestra en la Figura 2.1, la clasificación comprende: las ondas de radio (incluyendo las microondas), la luz (incluyendo luz ultravioleta, visible e infrarroja), radiación calórica, rayos X, rayos gamma y rayos cósmicos. [6]

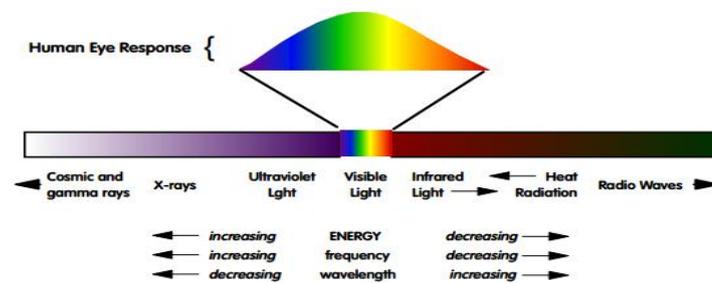


Figura 2.1. División del espectro electromagnético. [6]

2.1.1 Espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es un conjunto de ondas electromagnéticas o también conocidas como ondas hertzianas en honor al que demostró su existencia, Heinrich Rudolf Hertz, y comprende el rango de frecuencias que va desde los 3 Hz a los 300GHz. [6]

El espectro radioeléctrico es patrimonio de cada nación y lógicamente lo administran sus estados, que son los encargados de distribuir de forma responsable y equitativa las frecuencias. [6]

Como se menciona en un artículo publicado en la página de la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones “El espectro radioeléctrico es considerado por la Constitución de la República del Ecuador como un sector estratégico, por tanto, el Estado se reserva el derecho de su administración, regulación, control y gestión. Dentro de este contexto, la legislación de telecomunicaciones ecuatoriana lo define como un recurso natural limitado, perteneciente al dominio público del Estado, inalienable e imprescriptible.”[7]

Este subconjunto del amplio espectro electromagnético se distingue por sus posibilidades para la transmisión de información por el medio inalámbrico. Según el reglamento vigente de la UIT-R (Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones), se considera que las frecuencias del espectro radioeléctrico están por debajo de los 3000 GHz. Sin

embargo en la práctica y en base a las recomendaciones de la UIT-R las frecuencias por debajo de los 9 KHz, y por encima de los 275 GHz no se atribuyen a los operadores por ser frecuencias no aptas para la comunicación debido a su baja tasa de transmisión, y por limitaciones tecnológicas del equipamiento empleado respectivamente. [5]

Según la recomendación UIT-R V-431-7, cada banda de frecuencia del espectro posee su propia nomenclatura en función de su frecuencia y de la longitud de onda de la radiación electromagnética. Las ondas de radio forman 9 de estas bandas, desde la banda 4, VLF (Very Low Frequency) que comprende el rango de 3 KHz a 30 KHz hasta la banda 12, THF (Tremendous High Frequency), que comprende el rango de 300 GHz a 3000 GHz y aún no ha sido explotada para la implementación de servicios de comunicación según la UIT. [5]

Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran las nomenclaturas y los segmentos de frecuencia específicamente para las utilizadas en los sistemas de radiodifusión, y comunicaciones espaciales. [5]

Tabla 2.1. División y nomenclatura de las bandas de frecuencia para la radiodifusión. [5]

DESIGNACIÓN	GAMAS DE FRECUENCIAS EN RADIODIFUSIÓN SONORA Y TELEVISIÓN (MHZ)		
	Región 1	Región 2	Región 3
I	47 – 68	54 – 68	47 – 68
II	87,5 – 108	88 – 108	87 – 108
III	174 – 230	174 – 216	174 – 230
IV	470 – 582	470 – 582	470 – 582
V	582 – 960	582 – 960	582 – 960
VI	12 GHz (Radiodifusión por satélite)		

Tabla 2.2. División y nomenclatura de las bandas de frecuencia para las radiocomunicaciones espaciales. [5]

SÍMBOLO	BANDA EN RADIOCOMUNICACIONES ESPACIALES (GHZ)
L	Banda de 1.5
S	Banda de 2.5
C	Banda 4/6
Ku	Banda de 11/14, Banda de 12/14
K	Banda de 20
Ka	Banda de 30
V	Banda de 40

2.1.2 Propagación de las ondas electromagnéticas

Cada radiación electromagnética tiene su propia longitud de onda.

El período de una onda, T , está directamente relacionado con su longitud. La longitud de onda de toda radiación electromagnética,

es la distancia entre dos picos consecutivos, y el tiempo que los dista es el período, tal como se muestra en la Figura 2.2. [6]

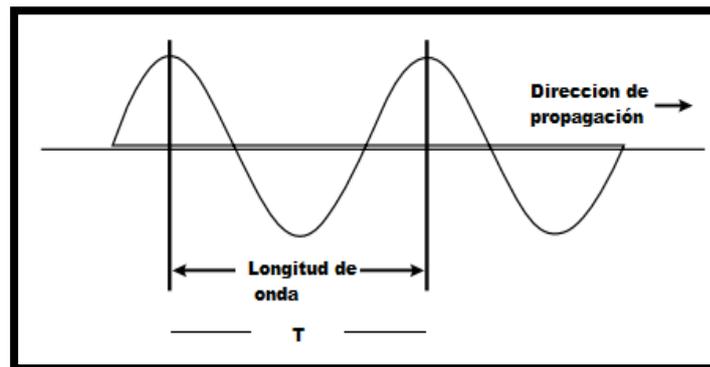


Figura 2.2. Longitud de onda de la radiación electromagnética. [6]

Las ondas electromagnéticas pueden ser descritas por su frecuencia f , la cual se denota como las veces en que la amplitud de una onda completa, pasa por un punto fijo referencial en una unidad de tiempo.

El tipo de radiación electromagnética en el espectro, se puede clasificar por su frecuencia o longitud de onda como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Clasificación de las ondas electromagnéticas. [6]

Tipo de radiación	Frecuencia (Hz)	Longitud de onda
Rayos Gamma	$< 3 \times 10^{20}$	$< 1 \text{ fm}$
Rayos X	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{20}$	$1 \text{ fm} - 1 \text{ nm}$
Rayos Ultravioleta	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$1 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$
Visible	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$0.4 \text{ }\mu\text{m} - 0.75 \text{ }\mu\text{m}$
Infrarrojo cercano	$10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$0.75 \text{ }\mu\text{m} - 3.0 \text{ }\mu\text{m}$
Infrarrojo de onda media	$5 \times 10^{13} - 10^{14}$	$3 \text{ }\mu\text{m} - 6 \text{ }\mu\text{m}$
Infrarrojo de onda larga	$2 \times 10^{13} - 5 \times 10^{13}$	$6 \text{ }\mu\text{m} - 15 \text{ }\mu\text{m}$
Infrarrojo lejano	$3 \times 10^{11} - 2 \times 10^{13}$	$15 \text{ }\mu\text{m} - 1 \text{ mm}$
Microondas y ondas de radio	$< 3 \times 10^{11}$	$> 1 \text{ mm}$

Las ondas de radio son el tipo de radiación electromagnética que da lugar a las radiocomunicaciones en nuestro planeta. Sus características de propagación tanto en la Tierra como en el espacio hacen posible la transmisión de información entre varios destinos para múltiples propósitos. [5]

El modo con que se propaga una onda electromagnética depende de su frecuencia y de las propiedades específicamente eléctricas y magnéticas que tienen tanto el terreno subyacente como la atmósfera. Se puede dividir en tres formas de propagación: ondas terrestres o de superficie, ondas reflejadas o ionosféricas, y las ondas directas o espaciales. [5]

2.1.2.1 Efectos del medio y parámetros de propagación.

Las ondas de radio son afectadas durante su propagación por algunos fenómenos presentes en el medio. Entre los principales se tienen: [8]

- Reflexión y efecto multipaso
- Refracción atmosférica
- Absorción atmosférica
- Curvatura del trayecto
- Estación terrena
- Difracción y pérdidas por obstrucción
- Pérdidas en el espacio Libre
- Despolarización de las ondas de radio
- Tormentas magnéticas
- Efectos del sol

Estos fenómenos están relacionados con las capas atmosféricas, principalmente con la ionósfera y tropósfera.

[8]

Para realizar un estudio de propagación de las ondas de radio, se debe considerar los siguientes parámetros que están relacionados con el medio donde viajan las radiaciones: [8]

- Impedancia intrínseca del medio, denotada por η
medida en Ohm.
- Constante de atenuación, denotada por α medida
en Neper/m
- Constante de fase, denotada por β medida en
Rad/m
- Número de onda, denotado por k medida en
Rad/m
- Constante de propagación, denotada por γ medida
en m^{-1}
- Índice de refracción, denotada por n

Los parámetros η y k normalmente son valores complejos, mientras que α y β son cantidades reales relacionadas con

la constante de propagación, $\gamma = \alpha + j \beta$. La impedancia intrínseca del espacio libre es también un valor real: [8]

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 3770 \text{ hm} \quad (2.1)$$

De igual manera el número de onda k en el espacio libre es un valor real: [8]

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{\epsilon}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.2)$$

2.1.2.2 Polarización de las ondas de radio

La polarización es una propiedad de las de las ondas de radio que describen variaciones en el tiempo del campo eléctrico en un punto determinado del espacio. No es necesario definir el campo magnético por separado, ya que si hablamos de un medio homogéneo y para el caso de ondas planas, es decir que tienen frecuencia constante y se propagan en una sola dirección, los campos magnéticos \vec{H} y eléctricos \vec{E} son perpendiculares entres sí, y la relación en entre ambos es una constante igual a la impedancia característica del medio η . [8]

Las principales formas de polarización se detallan a continuación:

- Si \vec{E} es continuamente horizontal, su polarización es llamada horizontal. [8]
- Si \vec{E} es continuamente perpendicular al plano horizontal, su polarización es llamada vertical. [8]
- Si la proyección de \vec{E} , en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda de radio en cualquier punto en el espacio forma un círculo, su polarización es llamada circular. [8]
- Si la proyección de \vec{E} , en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda de radio en cualquier punto en el espacio forma una elipse, su polarización es llamada elíptica. [8]

2.1.3 Enlaces de radio

Los enlaces de radio representan la comunicación entre los terminales de radio, transmisor y receptor. En la Figura 2.3 se detallan las diferentes formas que puede tener un enlace de radio en base a la forma de propagación de las ondas. [8]

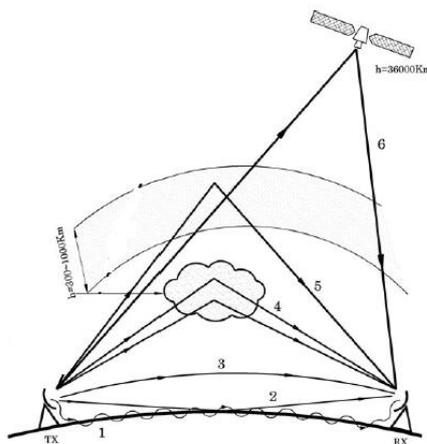


Figura 2.3 Enlaces de radio [6]

- Enlaces que utilizan el modo de propagación de ondas terrestres, la cuales son comúnmente usadas en la radiodifusión AM, radionavegación y pequeños sistemas de radio.[8]
- Enlaces en el que las ondas de radio son reflejadas por el suelo y por los obstáculos que hay en el medio, produciendo

multitrayecto para llegar al receptor, comúnmente usados en los sistemas que utilizan la banda UHF y microondas para sus transmisiones, como radiodifusión FM, distribución de televisión. [8]

- Enlaces con línea de vista entre el transmisor y receptor, usados en las enlaces microondas, sistemas UHF, y en redes de radares. [8]
- Enlaces troposféricos los cuales usan una capa atmosférica (Tropósfera) y aprovechan las propiedades de reflexión y refracción de las ondas de radio para poder llegar a su destino. [8]
- Enlaces ionosféricos, empleados para comunicaciones de larga distancia, en el cual se emplea el modo de propagación de ondas reflejadas o ionosférico.[8]

- Enlaces satelitales para comunicaciones entre las estaciones terrenas y los satélites ya sea en la órbita geoestacionaria o en las órbitas meoestacionarias que son las más utilizadas. [8]

2.1.3.1 Pérdida en espacio libre

El espacio libre es una condición ideal del medio de propagación de las ondas de radio, en donde no existe absorción de la energía que transportan o fenómenos que la atenúen. [8]

En el espacio libre la potencia irradiada por una antena isotrópica, es decir que irradia la misma intensidad de energía en todas las direcciones y que tiene por ganancia el valor de 1, resulta en la densidad de flujo de potencia en el espacio libre denotada por P_o , la misma que a una distancia d de la antena se la puede representar como: [8]

$$P_o = \frac{P_t}{4\pi d^2} = \frac{E_o}{2\eta_0} \quad (2.3)$$

En donde P_t es la potencia transmitida en Watts, d es la distancia desde la antena a un determinado punto en el espacio en metros, E_o es la magnitud del campo eléctrico en Voltios/metros y η_o es la impedancia intrínseca del medio que en este caso por tratarse del espacio libre tiene el valor de $120\pi\Omega$. Si definimos el parámetro G_t como la ganancia de la antena emisora, la densidad de flujo de potencia P estará dada por: [8]

$$P = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (2.4)$$

Para la recepción, si usamos una antena cuya apertura efectiva denominamos como A_e , la señal receptada por ésta estaría dada por: [8]

$$P_r = P A_e \quad (2.5)$$

Que de acuerdo a teoría electromagnética A_e tiene la siguiente expresión: [8]

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2.6)$$

Si manipulamos las tres últimas expresiones, se deriva la siguiente expresión: [8]

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \times \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2.7)$$

Para el cálculo de las pérdidas en el espacio libre en un enlace de radio, considerando la expresión anterior y asumiendo los valores de los parámetros $G_r = G_t = 1$. [8]

$$FSL = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2.8)$$

$$FSL = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (2.9)$$

Considerando que $\lambda = c/f$ entonces tenemos: [8]

$$FSL = 20 \log \frac{4\pi f d}{c} \quad (2.10)$$

FSL cuyas siglas en inglés son Free Space Loss, representa las pérdidas de un enlace de radio en el espacio libre, considerando que la frecuencia f debe estar en MHz o en GHz, la distancia d en Km, y colocando el valor de la velocidad de la luz, c en m/s. De acuerdo a lo mencionado FSL puede ser determinada por las dos siguientes expresiones: [8]

$$FSL(dB) = 32.4 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (Km) \quad (2.11)$$

$$FSL(dB) = 92.4 + 20 \log f (GHz) + 20 \log d (Km) \quad (2.12)$$

2.1.3.2 Potencia Irradiada Equivalente (PIE)

Los niveles de potencia que emiten las antenas en los enlaces de radio son muy importantes de conocer ya que determinan la calidad de un sistema de comunicación. La potencia emitida o receptada depende de las características de las antenas, especialmente de la ganancia que poseen. La ganancia de una antena está definida como la relación entre la potencia requerida a la entrada de una antena ideal, isotrópica, y la potencia a la entrada de una antena dada para producir la misma densidad de flujo de potencia en un punto determinado a una dirección específica. [8]

Normalmente la ganancia de una antena es expresada en decibelios, dB, y hace referencia a la dirección de máxima radiación. El valor de la ganancia es proporcional a sus dimensiones, comparadas con la longitud de onda de la radiación electromagnética con la que interactúan, y también de la eficiencia de su diseño. [8]

La ganancia de la antena siempre es comparada con un modelo de referencia y dependiendo de ello puede ser expresada de las siguientes maneras: [8]

- Cuando la antena de referencia es una antena isotrópica en el espacio libre, entonces la ganancia se denota como G_i y se conoce como ganancia absoluta isotrópica. [8]
- Cuando la antena de referencia es un dipolo de cuarto de onda, $\lambda/4$, aislado en el espacio libre, entonces la ganancia de la antena es denotada como G_d y es conocida como la ganancia de un dipolo. Entre ambas ganancias mencionadas existe una relación la cual se define como: [8]

$$G(dB_i) = G(dB_d) + 2.15 \quad (2.13)$$

- Cuando la antena de referencia es un dipolo Hertziano o un pequeño conductor vertical o monopolo, entonces la ganancia de la antena es denotada como G_v y es conocida como ganancia de dipolo Hertziano. Esta

ganancia se relaciona con la ganancia isotrónica de la siguiente manera: [8]

$$G(dB_i) = G(dB_v) + 4.8 \quad (2.14)$$

Normalmente para describir la ganancia de una antena se considera la banda donde se está operando:[6]

- G_i para las bandas UHF, SHF, y EHF. [6]
- G_d para las bandas VF y UHF. [6]
- G_v para las bandas LF y MF. [6]

La potencia irradiada equivalente, incluye todos los factores de ganancia y pérdida como conectores del lado del transmisor de radio y usualmente es expresada en dBm. Se expresa de la siguiente forma: [8]

$$PIE = \frac{G_t P_t}{L_t} \quad (2.15)$$

Para el caso de un dipolo de media onda su expresión es la siguiente: [8]

$$PIE (dB_m) = P_t(dB_m) + G_t(dB_d) - L_t(dB) \quad (2.16)$$

Si se hace referencia a una antena isotrópica, se consigue la siguiente expresión la cual se denomina Potencia irradiada isotrópica equivalente: [8]

$$PIE (dB_m) = P_t(dB_m) + G_t(dB_i) - L_t(dB) \quad (2.17)$$

2.1.3.3 Pérdidas totales en un radioenlace

De acuerdo a los conceptos respaldados por la ITU en cuanto a las pérdidas de potencia que sufre una señal electromagnética en un sistema de comunicación inalámbrica, las pérdidas totales de un sistema, L_s , se definen con la siguiente relación: [8]

$$L_s(dB) = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_a}\right) \quad (2.18)$$

En donde:

P_t : Es la potencia que se suministra a la antena transmisora Tx. [8]

P_a : Es el nivel de potencia presente en la salida de la antena receptora Rx. [8]

Cabe recalcar que las pérdidas que se han considerado hasta ahora sólo incluyen las que están presentes desde el sistema transmisor hasta la entrada de la antena receptora, sin embargo si se analiza los niveles de potencia con respecto al equipo receptor, se debe considerar los medios por los cuales atraviesa la señal antes de ser adquirida en el mismo. Entre los más comunes tenemos, cables (coaxiales), conectores (RG-6, RG-11), amplificadores, divisores, atenuadores y acopladores de señal. Todos los anteriormente mencionados alteran la potencia de la señal recibida ingresando al sistema señales aleatorias conocidas como ruido, que resultan en otro tipo de pérdidas que deben ser consideradas. Sabiendo que la señal receptada debe pasar por una serie de etapas para su acondicionamiento, principalmente de filtrado y amplificación, éstas deben alcanzar un nivel de potencia que por lo menos logre superar la sensibilidad del receptor. [8]

2.1.3.4 Ruido térmico

En la recepción de las ondas de radio, se utiliza el hardware adecuado para la adquisición de dichas señales. El hardware comprende la circuitería electrónica de la que está compuesto el receptor. Tomando como ejemplo un elemento pasivo como el resistor, en donde a una cierta temperatura de operación, los electrones se mueven libremente debido a la excitación térmica a la que se someten. Esto causa una diferencia de potencial en los terminales del elemento pasivo, lo cual es conocido como ruido térmico [9].

El teorema de máxima potencia transferida indica que la máxima potencia de ruido es transferida a una fuente de ruido térmico cuando la impedancia de la carga es la conjugada de la impedancia de la fuente. [9]

Teóricamente la potencia disponible que puede ser transferida bajo las condiciones anteriormente mencionadas está dada por, [9]

$$P = kTB \quad (2.19)$$

Esto significa que la potencia de ruido disponible puede de cualquier fuente de ruido, si es medida sobre el mismo ancho de banda B , puede ser representada como un elemento pasivo con una temperatura T . [9]

$$P = 10\log(kTB) \quad (2.20)$$

Por lo tanto podemos calcular la potencia de ruido térmico en dBm a una temperatura de 290 K y un ancho de banda de 1HZ y la potencia de ruido térmico en dBm se define como:[8]

$$N = -174 \text{ dBm/Hz} \quad (2.21)$$

2.2 Banda UHF del espectro radioeléctrico

La banda UHF (Ultra High Frequency) es el segmento del espectro radioeléctrico cuyo rango de frecuencias se extiende desde los 300 MHz

a los 3 GHz; por lo tanto la dimensión de sus longitudes de onda está entre los 10 centímetros y 1 metro. [5]

El comportamiento de la atmósfera terrestre frente a este segmento del espectro, hace posible de manera prevalente el modo de propagación directa, y esporádicamente la propagación ionosférica de las ondas electromagnéticas, convirtiendo a esta banda útil para los enlaces de radiodifusión, radares en la navegación aérea y también es empleada en las comunicaciones satelitales. Algunos de los servicios que se distribuyen en esta banda son: televisión analógica, televisión digital terrestre (TDT), los servicios de telefonía móvil terrestre (GSM, UMTS, etc) y las tecnologías de redes inalámbricas como Wifi (WLAN) y bluetooth (WPAN). [5]

Las bandas de VHF (Very High Frequency) y UHF son muy utilizadas para la radiodifusión televisiva en todo el mundo, ya sea para la televisión abierta o codificada, siendo ésta última comúnmente distribuida en la banda UHF. A pesar de que la banda VHF deja relegada a la UHF por ser utilizada por los canales de televisión más importantes y de mayor

audiencia, no deja de ser necesario el estudio del espectro en cuanto a la eficiencia del uso que se le brinda.[5]

2.3 Televisión analógica

Se detallarán algunos conceptos referentes a la televisión analógica.

2.3.1 Televisión

La palabra Televisión proviene del vocablo griego “tele” (distancia) y el término latino “visio” (visión), refiere a un sistema de envío-recepción de imágenes en movimiento y audio en movimiento transmitidos por ondas de radio o por sistemas de redes especializadas a televisión por cable.

2.3.2 Modulación de video

Todos los sistemas de televisión analógicos utilizan modulación de banda lateral residual, modulación de amplitud en la que una banda lateral se elimina parcialmente, lo cual reduce el ancho de

banda de la señal transmitida y permite utilizar canales de ancho de banda más angostos.[10]

2.3.3 Modulación de Audio

Una señal de audio para señales de video analógicas es siempre modulado de forma individual ya sea en AM o FM, por lo tanto las señales de audio y video se combinan en el transmisor para poder ser enviadas conjuntamente.[10]

2.3.4 Luminancia

Es la parte de la señal de video que recibe la información con toda la intensidad luminosa y se representa la imagen en blanco y negro con todos los tonos mediante la escala de grises. No contiene información sobre los colores de la imagen.

2.3.5 Crominancia

Es la parte de la señal del video que contiene la información del color. Se usa diferentes sistemas de codificación de color, el más importante es el RGB, el cual utiliza la televisión en general.

2.3.6 Estándares de Sistemas de Televisión analógica

Existen 3 tipos de señales de video analógico utilizadas:

- NTSC National Television System Committee creado en Estados Unidos
- PAL Phase Alternation Line creado en Alemania
- SECAM Séquentiel Couleur à Mémoire creado en Francia

En el Ecuador se ha adoptado el estándar americano NTSC para la transmisión de Televisión analógica por lo cual el estudio sobre las señales analógicas se dará para este estándar.[11] En la Figura 2.4 se aprecia la división de los sistemas para transmisión televisión analógica a nivel mundial.

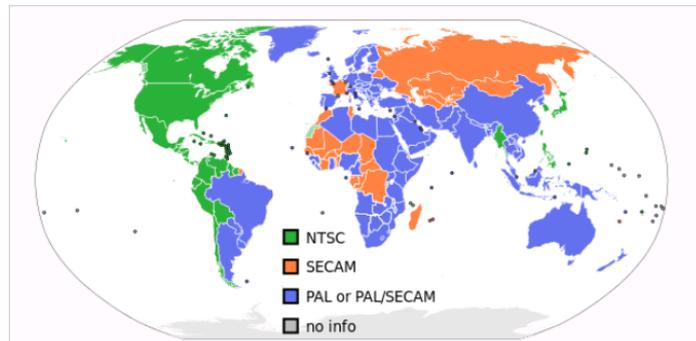


Figura 2.4 Distribución global de Estándares para TV analógica [10]

2.3.7 Señal de video analógica

Una señal de video analógica está determinada por las siguientes características:

- Señal de Video Compuesto: Luminancia y Crominancia
- Señales de Sincronismo: Horizontal y Vertical
- Señales de audio

2.3.8 Televisión a color

Una señal de luminancia se conoce con señal Y la cual puede ser modulada en dos fases 0° y 90° I y Q respectivamente por lo cual también se conoce a la señal como YIQ. Esta señal está comprendida entre los valores de 1mVp para color negro y de 1Vp

para color blanco, los valores intermedios definirán la escala de grises, en la Figura 2.5 se verifica una señal de luminancia en escala de grises.

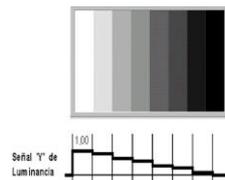


Figura 2.5 Señal de Luminancia, escala de grises [10]

Una cámara de TV es capaz de captar 3 colores básicos Rojo, Verde y Azul, RGB por las siglas correspondientes en inglés de estos colores, mediante estos colores se puede representar el resto, por lo que un receptor al mantener información de estas 3 señales podrá obtener información del color real de la señal de video.

La señal de crominancia es formada con la combinación de las señales I y Q, las mismas que se generan de la siguiente manera:

$$I = 0.60R - 0.28G - 0.32B \quad (2.22)$$

$$Q = 0.21R - 0.52G + 0.31B \quad (2.23)$$

Mientras que la señal de luminancia se expresará:

$$Y = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (2.24)$$

Es importante conocer que para un receptor de TV monocromático simplemente se filtra la información del color para presentar las imágenes en blanco y negro.

En la Figura 2.6 se muestra el proceso para la modulación de la señal de luminancia Y.

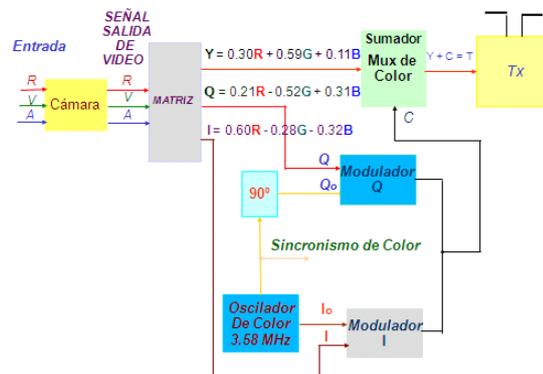


Figura 2.6 Modulación de Señal Y [10]

Una señal de televisión analógica es modulada en AM, pero como Banda Lateral Vestigial y el sonido se encuentra modulado en FM.

Como resumen en la Figura 2.7 se presentan las señales de transmisión de televisión analógica diferenciando televisión blanco y negro y televisión a color.

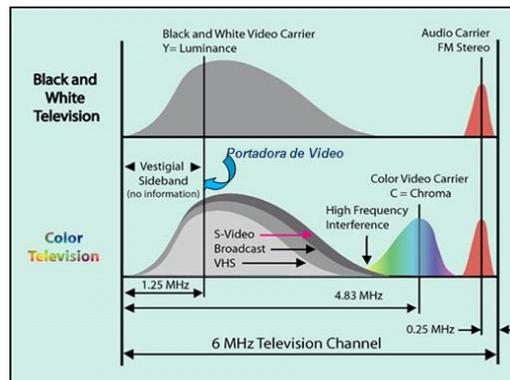


Figura 2.7 Señal analógica de TV blanco y negro vs TV a color [10]

2.4 Sistemas de Televisión Digital Terrestre TDT

Sistema de transmisión de imágenes en movimiento junto con el audio correspondiente transportadas a través de un canal o frecuencia, en un medio de repetidores terrestres, para que sean recibidas libremente por un receptor, en este caso televisor, estas imágenes y audios se encuentran procesados de forma digital.

Antes de aparecer la TDT, las señales digitales sólo podían ser transmitidas por cable o satélite, necesitando así para la recepción una antena parabólica o un decodificador de señal digital, sin embargo con esta tecnología la recepción de señales digitales ya puede darse de forma más sencilla.

2.4.1 Video digital

El video digital es un sistema de grabación de video, tratado con procesos digitales, es decir lo almacena como un código binario en un formato digital ya sea AVI, MPG entre otros.

2.4.2 Estándares para la TDT

Se han implementado varios estándares para la TDT, los mismos que se detallarán sus características principales a continuación:

2.4.2.1 ATSC

Advanced Television Systems Committee, para este estándar se define un ancho de señal de 6MHz entre audio

y video y permite transportar datos una velocidad de 19.39Mbps.[12]

Este sistema puede portar una señal HDTV y varias señales SDTV. Para la compresión de video utiliza formato MPEG2- y para audio AC 3.

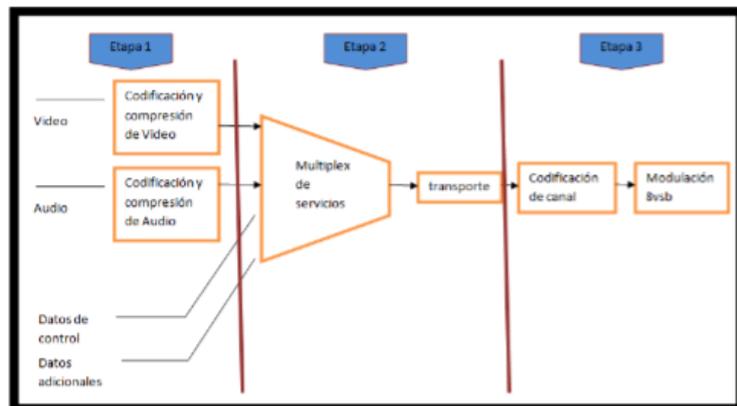


Figura 2.8 Modelamiento ATSC [12]

Se definen 3 etapas para ATSC, según Figura 2.8

- Etapa 1: codificación y compresión de audio y video
- Etapa 2: multiplexación de servicios y transporte
- Etapa 3: Transmisión

2.4.2.2 DVB

Digital Video Broadcasting, creado en Europa, en este sistema se utiliza la compresión de audio y video en formato MPEG-2, se puede usar un ancho de banda de 6, 7 u 8 Mhz.[12]

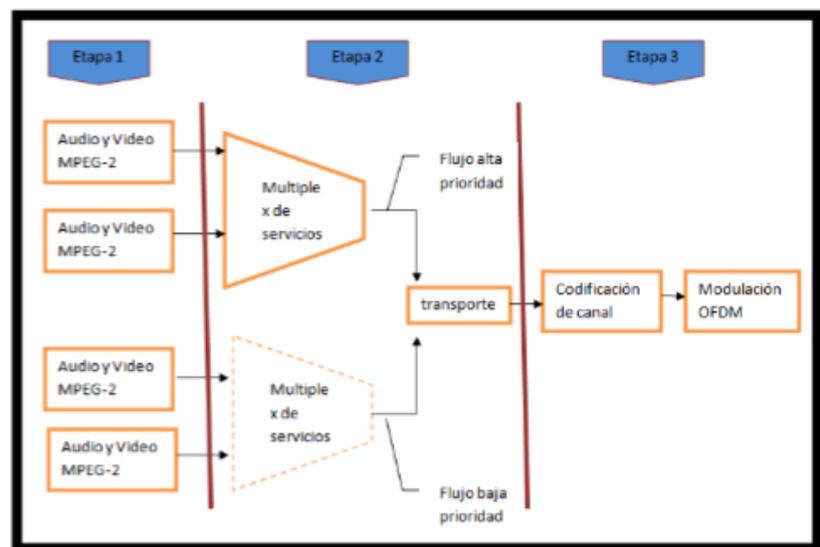


Figura 2.9 Modelamiento DVB [12]

Se definen 3 Etapas, las cuales presentan algunas similitudes con ATSC, Figura 2.9

- Etapa 1: Codificación y compresión de audio y video
- Etapa 2: Multiplexación de servicios y transporte
- Etapa 3: Transmisión

2.4.2.3 ISDBT

Integrated Service Digital Broadcasting – Terrestrial, creado en Japón, presenta similares características que el sistema DVB, ya que trabaja con codificación MPEG-2 para audio y video y se mantiene en un ancho de banda de 6 MHz, asimismo utiliza modulación OFDM para su transmisión, sin embargo este sistema está también orientado a la transmisión de datos como textos diagramas e imágenes fijas o móviles para dispositivos portátiles incluso acceso a internet.[12]

2.4.2.4 SBTVD

Sistema Brasileiro de Televisão Digital, el cual es una variación de ISDB-T, entre las principales características de este sistema se puede apreciar que se mantiene un ancho de banda de 6Mhz, para compresión de audio y video se usa formato MPEG-4 y para la modulación de la señal se usa 64-QAM –OFDM y en la Figura 2.10se muestra el diagrama de bloques para este sistema.[12]

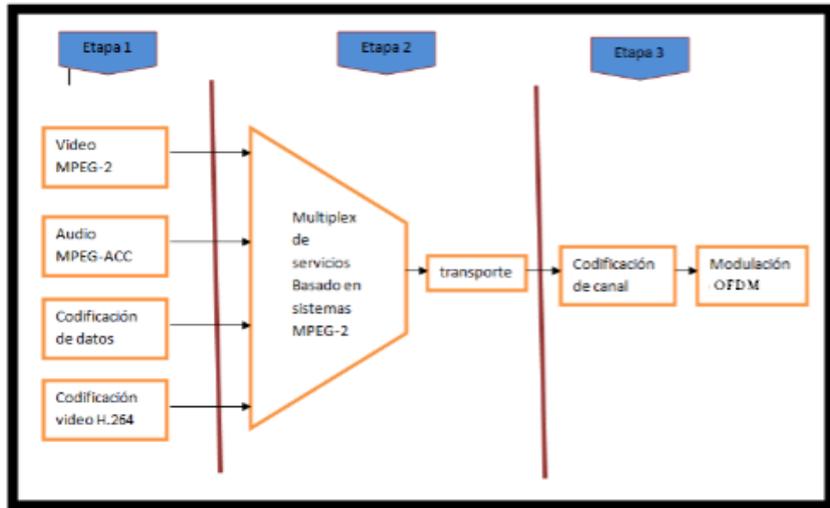


Figura 2.10 Modelamiento SBTVD [12]

Se verifica la distribución de los estándares de transmisión de TDT alrededor del mundo en la Figura 2.11.

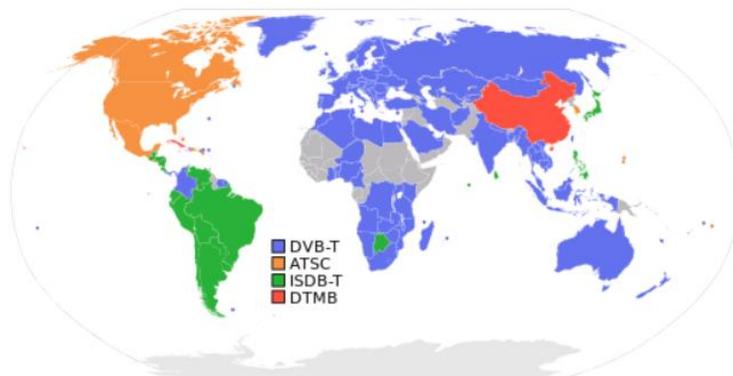


Figura 2.11 Distribución global de estándares TDT[10]

2.5 Sistema de TV en el Ecuador

2.5.1 Cuadro de atribución de frecuencias para la banda de 512MHz a 698MHz

En base a la información del plan nacional de frecuencias PNF, se verifica que la banda de 512 MHz a 698 MHz, está distribuida para el servicio de Televisión analógica y digital terrestre, así como también un ancho de 6 MHz para servicios de radioastronomía.

A continuación se presenta el cuadro de atribución de Frecuencias establecido en el PNF el 4 de Julio del 2012, el cual se encuentra basado en las resoluciones aprobadas por el CONATEL en el 2000 y también con relación a la gestión del espectro radioeléctrico y rigiéndose por la distribución de bandas de frecuencias establecidas por la UIT y aprobaciones en las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones en los años 2003, 2007 y 2012.[13]

Según la UIT se ha distribuido al mundo en 3 regiones, y Ecuador se encuentra ubicado en la región 2, en la Tabla 2.4 se presentará la distribución para la región en estudio, en la primera columna se mantienen los servicios dados respecto a anchos de banda, en la

segunda se mostrarán los servicios proporcionados en el Ecuador en base a la región, y en la tercera tabularán las notas que establecen normas, estándares, aplicaciones específicas parámetros técnicos para el tipo de servicio brindado.

Tabla 2.4, Atribución de frecuencias Ecuador. [13]

REGIÓN 2		ECUADOR	
BANDA (MHz)	BANDA (MHz)	Rango (MHz)	Nota EQA(resumen): Servicio (Sistema/Uso)
512 – 608 RADIODIFUSIÓN	512 – 608 RADIODIFUSIÓN	512 – 608 EQA 65: RADIODIFUSIÓN (emisiones de televisión)	
608 – 614 RADIOASTRONOMIA Móvil por satélite salvo móvil aeronáutico por satélite (Tierra – espacio)	608 – 614 RADIOASTRONOMIA Móvil por satélite salvo móvil aeronáutico por satélite (Tierra – espacio)		
614 – 698 RADIODIFUSIÓN Fijo Móvil	614 – 698 RADIODIFUSIÓN	614 – 698 EQA 70: RADIODIFUSIÓN (emisiones de televisión)	

Las notas internacionales y nacionales se describen de la siguiente manera:

- 5.297: Atribución adicional: en Canadá, Costa Rica, Cuba, El Salvador, Estados Unidos, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica y México, la banda 512-608 MHz está también atribuida, a título primario, a los servicios fijo y móvil.
- EQA.65: La banda 512 - 608 MHz, se utiliza para el servicio de RADIODIFUSIÓN con emisiones de televisión (canales de televisión 21 al 36).
- EQA.70: La banda 614 - 698 MHz, se utiliza para el servicio de RADIODIFUSIÓN con emisiones de televisión (canales de televisión 38 al 51).

Se verifica que el canal 37 designado de 608 a 614MHz se presenta para el servicio de Radioastronomía Móvil por satélite, excepto móvil aeronáutico por satélite (tierra-espacio), sin embargo no será

proceso de estudio ya que la investigación se hará para servicios de televisión.

2.5.2 Normas técnicas para la transmisión de TV en el Ecuador

2.5.2.1 Intensidad de campo mínima a proteger

Los valores de intensidad de campo definidos a 10 metros sobre el nivel del suelo para UHF son los mostrados en la Tabla 2.5 [11]

Tabla 2.5 Relaciones de protección para audio y video señal deseada/no deseada [11]

Banda	Cobertura principal	Cobertura secundaria
UHF 500-608	56 dBuV/m	71 dBuV/m
UHF 614-644 y 644-686	64 dBuV/m	74 dBuV/m

En donde la cobertura principal detallada en la Tabla 2.5 refiere al lugar dar el servicio, mientras que la cobertura secundaria se establece sobre los alrededores de la cobertura principal. El borde del área de cobertura de una estación de televisión, está determinado por el valor de la intensidad de campo mínima a proteger.[11]

Los valores que se han de considerar para las relaciones de protección señal deseada contra señal no deseada detalladas en la Tabla 2.6 son el valor eficaz de la portadora de la señal de televisión en la cresta de la envolvente de modulación y el valor eficaz de la onda portadora del sonido no modulada, lo mismo en el caso de modulación de frecuencia que en el de modulación de amplitud.[11]

Tabla 2.6 Relaciones de protección para audio y video señal deseada/no deseada [11]

Relación de protección				
VIDEO			AUDIO	
Separación entre Portadoras	Relación señal deseada/señal interferente	Interferencia	Relación señal deseada/señal interferente	Relación señal deseada/señal interferente
Inferior a 1000HZ	45 dB	Del Canal inferior	-6dB	28dB
1/3, 2/3, 4/3, ó 5/3 de la frecuencia de línea	28dB	Del Canal superior	-12dB	

La distancia mínima entre las estaciones de transmisión estarán determinadas por la interferencia cocanal y canal adyacente en el borde del área de cobertura, asimismo se

determina que la potencia máxima para transmitir será aquella que no genere un intensidad de campo que no sobrepase la intensidad de campo mínima a proteger, las antenas transmisoras deberán estar acorde a las regularizaciones de la Dirección de Aviación Civil referente a localización, alturas y balizas.[11]

Para establecer servicios en canales de transmisión se deberá presentar un estudio estableciendo que la interferencia presentada no influirá en las señal principal, para esto se considerará que la potencia radiada no podrá superar los 100W, diagrama de radiación de las antenas, atenuación de señales n deseadas mediante filtros. [11]

2.5.3 Estándares para transmisión de TV en Ecuador

Según los estándares para tv analógica y digital estudiados anteriormente, Ecuador se ha acogido al estándar norteamericano NTSC para televisión analógica y el estándar japonés-brasilero ISDBT-b o SBTVD para transmisión de televisión digital, por lo

cual se presentará un resumen con las principales características de estos dos estándares en la Tabla 2.7 y Figuras 2.12 y 2.13

Tabla 2.7 Especificaciones estándar NTSC [11]

Característica	Dato Técnico
Número de líneas	525
Ancho de banda de video	4,2MHz
Ancho de canal	6 MHz
Portadora de sonido respecto a la imagen	-4.5MHz
Frecuencia de línea	15750 Hz
Frecuencia de cuadro	60 Hz
Frecuencia Subportadora de color	3,58 MHz
Modulación de la portadora de imagen	Negativa
Modulación de la portadora de audio	En frecuencia

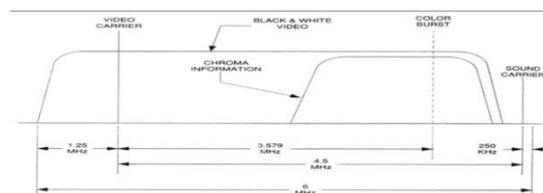


Figura 2.12 Señal TV analógica estándar NTSC [14]

Al igual que NTSC se regula al uso de ancho de banda de 6MHz para UHF, se muestra a continuación la señal de TV para TDT estándar ISDBT-b o SBTVD.

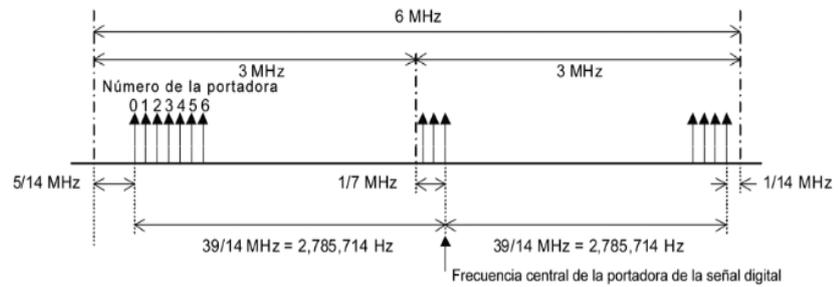


Figura 2.13 Señal TV digital estándar ISDBT-b o SBTVD.[15]

2.5.4 Canalización de la banda de 512 MHz a 698MHz

Para el estudio correspondiente es necesario conocer las frecuencias de las portadoras de audio y video, así conociendo la potencia determinaremos si el canal está o no ocupado.

Tabla 2.8 Canalización para TV Analógica NTSC [12]

Canal	Rango de Banda (MHz)	Portadora de Video	Portadora de Audio
21	512-518	513,25	517,75
22	518-524	519,25	523,75
23	524-530	525,25	529,75
24	530-536	531,25	535,75
25	536-542	537,25	541,75
26	542-548	543,25	547,75
27	548-554	549,25	553,75
28	554-560	555,25	559,75
29	560-566	561,25	565,75
30	566-572	567,25	571,75
31	572-578	573,25	577,75
32	578-584	579,25	583,75
33	584-590	585,25	589,75
34	590-596	591,25	595,75
35	596-602	597,25	601,75
36	602-608	603,25	607,75
37	608-614		
38	614-620	615,25	619,75
39	620-626	621,25	625,75
40	626-632	627,25	631,75
41	632-638	633,25	637,75
42	638-644	639,25	643,75
43	644-650	645,25	649,75
44	650-656	651,25	655,75
45	656-662	657,25	661,75
46	662-668	663,25	667,75
47	668-674	669,25	673,75
48	674-680	675,25	679,75
49	680-686	681,25	685,75
50	686-692	687,25	691,75
51	692-698	693,25	697,75

Tabla 2.9 Canalización para TV Digital ISDBT-b o SBTVD. [15]

Canal	Frecuencia inicial MHz	Frecuencia final MHz	Frecuencia central de la portadora central de la señal MHz
21	512	518	515
22	518	524	521
23	524	530	527
24	530	536	533
25	536	542	539
26	542	548	545
27	548	554	551
28	554	560	557
29	560	566	563
30	566	572	569
31	572	578	575
32	578	584	581
33	584	590	587
34	590	596	593
35	596	602	599
36	602	608	605
37			
38	614	620	617
39	620	626	623
40	626	632	629
41	632	638	635
42	638	644	641
43	644	650	647
44	650	656	653
45	656	662	659
46	662	668	665
47	668	674	671
48	674	680	677
49	680	686	683
50	686	692	689
51	692	698	695

2.5.5 Frecuencias concesionadas en la banda TV UHF Provincia

Guayas

Tabla 2.10 Concesionarios TV Analógica Guayas [3]

PROVINCIA	CATEGORIA	CONCESIONARIO	NOMBRE ESTACION	FREC
GUAYAS	TV ABIERTA	ASAMBLEA NACIONAL AGUIRRE	TV LEGISLATIVA	22
GUAYAS	TV ABIERTA	NAVARRETE CARLOS ISIDRO	CANELA TV	24
GUAYAS	TV ABIERTA	PERONE S.A.	TV+	26
GUAYAS	TV ABIERTA	ASO.DE MINISTERIOS ANDINOS ASOMAVISION	ASOMAVISION	28
GUAYAS	TV ABIERTA	MUVESA C.A.	COSTANERA TV (RTU)	30,31
GUAYAS	TV ABIERTA	TELERAMA S.A.	TELERAMA	32
GUAYAS	TV ABIERTA	AMERICAVISION	CANAL INTIMAS	34
GUAYAS	TV ABIERTA	TELEVISION SATELITAL S.A. TV-SAT	TELEVISION SATELITAL	36
GUAYAS	TV ABIERTA	INDETEL S.A.	RED TV ECUADOR	38
GUAYAS	TV ABIERTA	UNIVERSIDAD CATOLICA SANTIAGO GUAYAQUIL	UCSG TELEVISION	42
GUAYAS	TV ABIERTA	RADIO CARAVANA S. A.	CARAVANA TELEVISION	44
GUAYAS	TV ABIERTA	JUAYATABC TELEVISION S.A.	ABC TV	46
GUAYAS	TV ABIERTA	SECRETARIA NACIONAL DE COMUNICACION	TELEVISION CIUDADANA	48

En base a la información proporcionada por la SUPERTEL en la tabla anteriormente presentada se muestran los canales concesionados en la ciudad de Guayaquil para el servicio de televisión analógica. [3]

A continuación en la Tabla 2.11 también extraída de la SUPERTEL, se detallan los canales de televisión concesionados para el servicio de televisión digital terrestre.[3]

Tabla 2.11 Concesionarios TV Digital Terrestre Guayas. [3]

PROV	CAT	CONCESIONARIO	NOMBRE ESTACION	FREC
GUAYAS	TDT	EMPRESA PUBLICA TELEVISION Y RADIO DE ECUADOR E.P. RTVECUADOR	ECUADOR TV	21
GUAYAS	TDT	CORPORACION ECUATORIANA DE TELEVISION S.A.	CORPORACION ECUATORIANA DE TELEVISION	23
GUAYAS	TDT	TELECUATRO GUAYAQUIL C.A.	RED TELESISTEMA (R.T.S)	25
GUAYAS	TDT	TELEAMAZONAS GUAYAQUIL S.A.	TELEAMAZONAS GUAYAQUIL	27
GUAYAS	TDT	CADENA ECUATORIANA DE TELEVISION (CANAL 10)	CADENA ECUATORIANA DE TELEVISION	29
GUAYAS	TDT	RELAD S.A.	CANAL UNO	33
GUAYAS	TDT	PERONE S.A.	TV+ (TEVEMAS)	35
GUAYAS	TDT	TELEVISION SATELITAL S.A. TV-SAT	TELEVISION SATELITAL	39
GUAYAS	TDT	MUVESA C.A.	COSTANERA (RTU)	41

Con la información anteriormente detallada podemos verificar que los canales 43, 45, 47, 49, 50, 51 no se encuentran concesionados, por lo cual en las mediciones que se realizarán más adelante, teóricamente no se debería tener señales transmitidas.

2.6 Sistemas de Acceso Dinámico al espectro, SDA (Spectrum Dynamic Access)

Comúnmente en la actualidad las redes de comunicación inalámbrica se caracterizan por obedecer a políticas de asignación de segmentos fijos de frecuencias del espectro radioeléctrico. En base a numerosos estudios que se han llevado a cabo sobre el uso del espectro electromagnético, se ha demostrado que gran parte de este recurso asignado no está siendo utilizado a tiempo completo, por lo cual ante la problemática actual de la escasez del espectro, motiva al desarrollo de sistemas de comunicación que determinen la eficiencia del mismo y lo aprovechen de manera oportunista en el caso de encontrar rangos de frecuencias disponibles, teoría en la que se basan los sistemas de Acceso Dinámico al Espectro. [15]

La tecnología radio cognitiva es un sistema de acceso dinámico al espectro, y se define como aquella que “cambia sus parámetros de transmisión basados en la interacción con el ambiente en el cual opera” [16]. La capacidad cognitiva que poseen estos sistemas, se refiere a la habilidad que poseen para sensar información del ambiente de radio. Esta capacidad no solamente se resume a monitorear la potencia de la señal en cierta banda de frecuencia, sino que se requiere de técnicas

sofisticadas para poder capturar variaciones temporales y espaciales en el ambiente donde operan y evitar interferencia de otros usuarios. [16]

Los principales parámetros que definen la dimensión del espectro son la frecuencia, tiempo, extensión espacial y el formato de la señal que se mide. La frecuencia y el tiempo hacen referencia a la frecuencia de la señal RF y el tiempo en que está presente. La extensión espacial representa la zona geográfica en la cual el receptor sensa la señal, y depende de las características de la localidad ya sea una zona urbana, suburbana o rural, el ángulo de arribo de las ondas de radio y el patrón de radiación de la antena empleada. [17] El Formato de la señal puede ser descrito por el tipo de polarización y la modulación empleada en la transmisión de la misma.

En un sistema de acceso dinámico al espectro el reto más importante es compartir el espectro legalmente concesionado a un determinado operador de telecomunicaciones sin causar interferencias en las transmisiones de otro usuario concesionario de cierto segmento del espectro en una misma banda. Los canales de frecuencia que son determinados por los sistemas radio cognitivos como segmentos sin

uso en un instante de tiempo se los conoce como agujeros del espectro o espacios en blanco. [16]

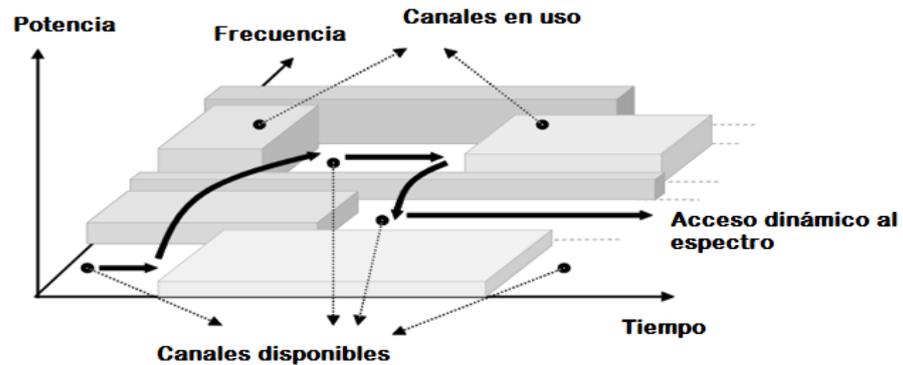


Figura2.14 Espacios disponibles del espectro radioeléctrico. [16]

2.7 Procesos de Markov

Un proceso estocástico es un conjunto de variables aleatorias X_0, X_1, \dots, X_n cuyos valores no se pueden predecir exactamente, sin embargo se puede definir las probabilidades para los distintos valores posibles que puedan tener para cualquier instante de tiempo. [18]

Podemos definir el estado inicial del proceso como X_0 y además X_n como el estado del proceso en el instante de tiempo n , por lo tanto para los

distintos posibles valores de las observaciones, S_0, S_1, \dots, S_n podemos denotar la probabilidad del estado siguiente del proceso como:[18]

$$P(X_{n+1} = S_{n+1} | X_0 = S_0, X_1 = S_1, \dots, X_n = S_n) \quad (2.25)$$

Una cadena de Markov es un proceso aleatorio en el que si el estado actual X_n en conjunto con los estados previos del proceso X_1, \dots, X_n son conocidos, entonces la probabilidad del estado futuro X_{n+1} no depende de los estados anteriores, sólo depende del estado actual X_n . Es decir para cualquier sucesión de posibles estados S_0, S_1, \dots, S_n , podemos definir la probabilidad del estado futuro como:[18]

$$P(X_{n+1} = S_{n+1} | X_0 = S_0, X_1 = S_1, \dots, X_n = S_n) = \\ P(X_{n+1} = S_{n+1} | X_n = S_n) \quad (2.26)$$

2.7.1 Cadenas de Markov finitas

Se considera una cadena de Markov finita si existe un número finito de estados posibles que pueden tener las observaciones del proceso.

En un proceso de Markov finito pueden existir cambios de estado en cualquier instante de tiempo, por lo cual para cualquier par de estados S_i y S_j existe una probabilidad de transición de estado P_{ij} la cual está definida como: [18]

$$P(X_{n+1} = S_j | X_n = S_i) = P_{ij} \quad (2.27)$$

2.7.2 Matriz de transición

La matriz de transición en una cadena de Markov es una matriz cuadrada cuyos elementos son valores mayores o iguales que 0 y la suma de los elementos de cada fila es igual a 1. Se define la Matriz de transición de estados como: [18]

$$P(X_{n+1} = S_j | X_n = S_i) = P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & \dots & P_{2m} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ P_{m1} & \dots & P_{mm} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

2.7.3 Vector de probabilidades iniciales

En una cadena de Markov con k posibles estados en los que el proceso puede encontrarse en la observación inicial $n = 0$ se define la probabilidad del estado inicial como: [18]

$$P(X_0 = S_i) = v \quad (2.29)$$

De tal forma que v es el vector de probabilidades de estado inicial $v = (v_1, v_1, \dots, v_k)$. El vector de probabilidades de estado inicial en conjunto con matriz de transición son los que determinan la probabilidad del estado siguiente del proceso la cual viene dada por la multiplicación de ambas matrices vP_{ij} . [18]

CAPÍTULO 3

SISTEMA DE MEDICIÓN EMPLEADO PARA SENSAR LAS ONDAS DE RADIO

3.1 Características del lugar de medición, ambiente de radio.

Las mediciones de las ondas de radio en la banda UHF del espectro radioeléctrico fueron realizadas en la facultad de Electricidad y Computación en el campus Prosperina de la ESPOL, el cual se considera un ambiente semirural debido a la combinación de predios vacíos, abundante vegetación y los edificios construidos que existen en él. En

este caso las ondas de radio están inmersas a sufrir un mayor debilitamiento en la energía que transportan por los distintos fenómenos que se pueden presentar en la propagación de la misma, como el desvanecimiento por multitrayecto, o también porque el campus se encuentra muy lejos de las repetidoras de señales de TV lo cual puede ser una ventaja para la implementación de un sistema de acceso dinámico al espectro.

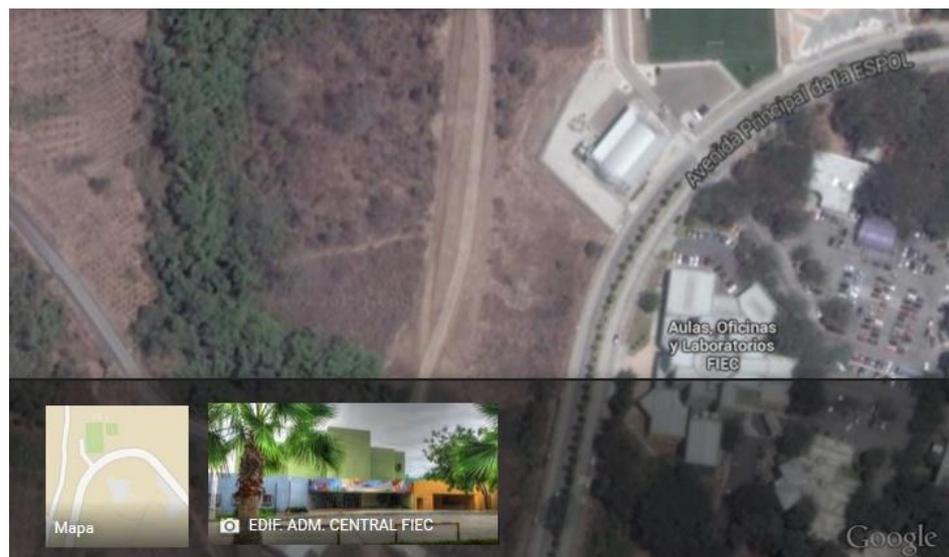


Figura 3.1 Lugar de medición, FIEC-ESPOL.

3.2 Elementos utilizados para la Medición del espectro

Para obtener los datos necesarios y establecer las características del rango a medir es necesario mantener un sistema de medición el cual se

muestra en la Figura 3.1, consta de la antena receptora Sirio SD 2000U, analizador de espectro Agilent E4404B y un computador para el almacenamiento y procesamiento de los datos gracias a los software instalados.

3.2.1 Antena receptora Sirio SD 2000U

La antena Sirio SD 2000U escogida para el proceso de medición es una antena de ganancia unitaria, discono, omnidireccional con un rango de frecuencias de recepción entre 100 a 2000Mhz ideal para el rango de frecuencia que se desea estudiar, la misma se encuentra instalada en el techo del edificio de la FIEC Campus Prosperina, la cual se aprecia en la Figura3.2.



Figura 3.2 Antena Sirio SD 2000 U
FIEC Campus Prosperina

3.2.2 Analizador de espectro Agilent E4404B

Para poder visualizar los datos receptados por la antena se ha escogido el analizador de espectros Agilent E4404B del laboratorio de Telecomunicaciones en el Edificio de la FIEC, el mismo permite trabajar en el rango de frecuencia de 9Kz a 6.7GHz, el equipo será calibrado de tal manera que permita visualizar el rango de frecuencias de 512 a 698 MHz, el analizador está conectado con la antena SIRIO SD 2000U por medio de un cable RG 58 de aproximadamente 10m de longitud, y además se conecta al computador por cable USB. Se aprecia el analizador de espectros en la Figura 3.3 a continuación.



Figura 3.3 Analizador de Espectro Agilent E4404B
Laboratorio de Telecomunicaciones FIEC

Una de las características más importantes del equipo de medición es la figura de ruido del mismo, la cual nos indica cuanto se degrada el nivel de SNR del sistema en el proceso de recepción.

La Figura 3.4 representa la figura de ruido NF de los analizadores espectrales del mismo fabricante que para el caso del Agilent E4404B, está representado por las líneas azules punteadas.

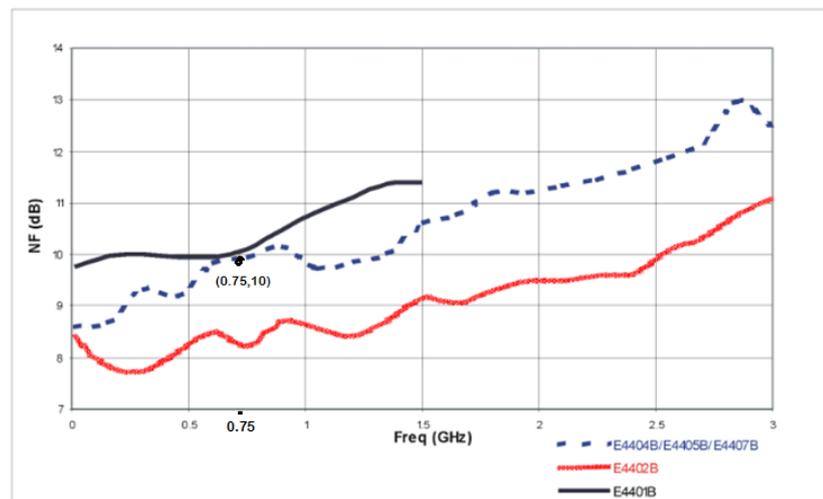


Figura 3.4 Figura de Ruido Agilent E4404B

Dado que la medición se realizó en un rango de frecuencias, de 512 a 698MHz, más no en un punto debemos considerar en promediar la función NF en el rango antes mencionado. Para este caso se considera que el comportamiento de la gráfica para el ancho de

banda considerado es parabólico, y se la puede expresar de la siguiente forma

$$(NF - k)^2 = -a(f - h)^2 \quad (3.1)$$

Donde h,k representa la ubicación del vértice de la parábola y a la abertura de la misma. De esta manera podemos obtener los parámetros de la parábola de la Figura 3.4, en donde se escogieron los valores de 10 y 0.75 para las constantes k y h respectivamente y por lo tanto obtener la constante a a partir de la función al reemplazar estos valores. La función NF estaría dada por

$$(NF - 10)^2 = -\frac{1}{12}(f - 0.75)^2 \quad (3.2)$$

El valor promedio de la función figura de ruido NF sobre el ancho de banda de interés, estaría dado por la siguiente expresión:

$$\overline{NF} = \frac{1}{(0.698 - 0.512)} \int_{0.512}^{0.698} NF(f) df \quad (3.3)$$

$$\overline{NF} = \frac{1}{(0.186)} \int_{0.512}^{0.698} -\frac{1}{(12)}(f - 0.75)^2 + 10 df$$

Por lo cual definimos el valor de NF en 9.974 dB.

3.2.3 Software para el análisis de los datos receptados

Se ha escogido el complemento de Microsoft Excel, Intuilink herramienta de fácil manejo la cual permite adquirir los datos manejados por el Analizador de Espectro y almacenarlos en hojas de Excel para luego poder ser procesados apreciamos la interfaz del software en la Figura 3.5

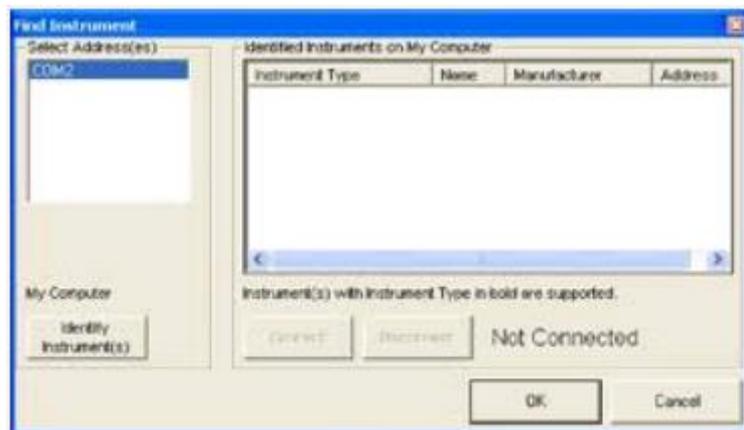


Figura 3.5 Software Intuilink

Adicional, se requiere del software Matlab para procesamiento de datos y generación de las gráficas representativas de las frecuencias y potencias que van a ser analizadas.

También se requiere la ayuda de la herramienta de escritorio remoto TeamViewer la cual permite con una conexión a internet poder manejar el software Intuilink desde cualquier parte donde el usuario este ubicado, esto debido a que no se puede estar físicamente con los equipos durante todo el proceso de medición de 7 días 24 horas.

3.3 Método de medición empleado.

Previamente a realizar las mediciones del espectro se tuvieron que definir los parámetros fundamentales para realizar una correcta adquisición de los datos. En nuestro caso el rango de frecuencias de la banda UHF considerado, está asignado a la radiodifusión por TV.

Se ha tomado una muestra por cada minuto del día por lo que se han obtenido 1440 muestras diarias por frecuencia, se analizará el uso diario de cada canal y se comprobará la utilización del canal diaria, siempre y cuando no exista alguna apreciación gráfica que demuestre alguna desocupación del canal durante las 24 horas, en tal caso se analizarán esos tiempos de desocupación.

Para detectar las señales de TV del estándar de transmisión analógico utilizado en nuestro país, NTSC, principalmente consideramos obtener muestras de las potadoras de audio y video de un canal de 6 MHz que son las que contienen más del 50% de la energía en todo el canal. El ancho de banda total a medir B_s , es dividido en segmentos más pequeños B_r , o spans de frecuencia los cuales fueron escogidos de tal manera que se realice la medición justamente en las portadoras de audio y video de un canal. Para que esto ocurra hemos variado el rango de medición con respecto a los límites superior e inferior y el ancho de banda de medición para nuestra conveniencia. Los spans de frecuencia B_r , fueron fijados en 1.5 MHz. Dado que aún con esta consideración no es sensada la señal en los puntos de interés, surge la necesidad de desplazar la frecuencia inicial de cada canal, 0.25MHz hacia atrás, es decir hacia el anterior canal, y al sumar a este nuevo valor fijado el span de frecuencia definido en 1.5 MHz obtenemos las medidas en las portadoras de audio y video como se desea. La relación entre el ancho de banda total a medir y el número de puntos que tomará el analizador de espectros por canal, se lo puede expresar de la siguiente manera,

$$B_r = \frac{B_s}{N} \quad (3.4)$$

Para el caso del presente proyecto el número de puntos por canal fue establecido en 401, y considerando el span de frecuencia fijado podemos verificar que el sistema requiere que la medición se la realice sobre un ancho de banda B_s , de 600 MHz, sin embargo una vez ya realizadas todas las mediciones, se estudiará el comportamiento desde 512 a 698 MHz, rango de 186MHz y se descartarán los valores de potencia que no correspondan al rango mencionado.

Los parámetros para una mejor resolución de las mediciones realizadas RBW y VBW fueron fijados en 3MHz.

Para el caso de un canal digital de TV, con estándar ISDB-T, se considera realizar principalmente la medición en la frecuencia central de cada uno los canales.

3.4 Procesamiento de los datos obtenidos.

El estudio del espectro radioeléctrico se lo puede dividir en tres etapas, 1) la adquisición y almacenamiento de los datos sensados del espectro radioeléctrico con ayuda del analizador, los cuales deben ser clasificados y ordenados en un formato adecuado. 2) El procesamiento de los datos, realizado para tener una clara distinción entre las señales de interés y las que representan el ruido medido del ambiente. En esta etapa se extraen las características de la ocupación del espectro de las mediciones realizadas. 3) El modelamiento de la ocupación del espectro para la implementación de los sistemas radio cognitivos. [19]

Sensar el espectro para detectar señales primarias o de los usuarios concesionarios de un determinado canal de frecuencias, es la función principal de un radio cognitivo. Existen tres métodos de detección de señales para un sistema de medición espectral: detección de energía, filtrado selectivo (detección coherente) y detección futura. Si sólo la potencia de ruido del sistema receptor es conocida, el método de detección de energía es el más óptimo. [20] Para el desarrollo del presente proyecto se escogió éste método para capturar la actividad de la banda medida.

La detección de la señal es realizada comparando la potencia de la señal a la entrada de la antena receptora con un umbral de potencia o también conocido con treshold. El treshold es una medida del ruido presente en el ambiente de radio donde se propaga la onda electromagnética. Matemáticamente, la señal detectada puede ser representada por la siguiente expresión, [21]

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = \mathbf{s}(\mathbf{x}) + \mathbf{w}(\mathbf{x}) \quad (3.5)$$

En donde $s(x)$ es la señal transmitida y $w(x)$ denota el ruido Gaussiano aditivo el cual es asumido en un sistema de comunicación inalámbrica. Para el estudio de la ocupación de un canal de frecuencias, se puede plantear una hipótesis binaria, la cual describe si el canal se encuentra ocupado H_1 o en su defecto desocupado H_0 , [21]

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \mathbf{w}(\mathbf{x}) & ; H_0 \\ \mathbf{s}(\mathbf{x}) + \mathbf{w}(\mathbf{x}) & ; H_1 \end{cases} \quad (3.6)$$

Para determinar los resultados de ésta función definida, es necesario definir el treshold de decisión el cual debe ser calculado solamente bajo las condiciones de ruido del sistema de recepción. [21]

3.4.1 Probabilidad de detección, probabilidad de falsa alarma

El conjunto de mediciones realizadas en la banda UHF del espectro en la FIEC, fueron procesadas con el objetivo de remover los datos aberrantes los cuales pueden producir errores en los cálculos estadísticos que determinan la ocupación de un canal de frecuencias.

La probabilidad de detección de una señal que nos permite especular acerca de la ocupación del espectro, es la probabilidad de que la potencia instantánea o muestra de la potencia de dicha señal sea mayor que el umbral de decisión o treshold. Dada la señal de potencia $r(t)$, la cual como se mencionó anteriormente se compone de la señal transmitida $s(t)$, y el ruido del ambiente $w(t)$, la probabilidad de detección de la señal que se transmite, denotada por δ , está dada por la integral definida de la función de densidad de probabilidad de $r(t)$, para valores superiores al nivel de treshold, [21]

$$\delta = \int_{treshold}^{\infty} f_{s(t)+w(t)}(v) dv \quad (3.7)$$

También puede existir el caso de que la probabilidad de detección calculada de la señal con respecto al umbral no sea la correcta. Las

señales transmitidas en un sistema de comunicación inalámbrico se ven afectadas por el ruido presente en el ambiente en el cual se propagan. En el caso de los sistemas de medición del espectro esta consideración resulta importante al momento de decidir si se está sensando una señal de potencia o simplemente el ruido del ambiente. En el análisis de ocupación del espectro pueden presentarse errores al momento de determinar la disponibilidad de un canal de frecuencias al detectar señales aleatorias, ruido, cuyos niveles de potencia son superiores al umbral, y por consiguiente un canal sea declarado como ocupado cuando en realidad no lo está. De esta manera se puede definir la probabilidad de error o probabilidad de falsa alarma en la detección de las señales, ε , como la integral definida de la función densidad de probabilidad del ruido $w(t)$, para valores superiores al nivel de treshold. [21]

$$\varepsilon = \int_{treshold}^{\infty} f_{w(t)}(v) dv \quad (3.8)$$

Estos dos parámetros anteriormente definidos son importantes para el modelamiento de la ocupación del canal el cual se explicará en el siguiente capítulo.

3.4.2 Histograma de las mediciones de potencia.

Para un mejor análisis de todas las mediciones obtenidas durante una semana, se realizó un histograma de los niveles de potencia de la señal receptada, en el cual se puede distinguir que existen valores que ocurren con mayor frecuencia, tal como se muestra en la Figura 3.6. Haciendo un enfoque específico en la no ocupación del espectro, o ruido medido, el cual es representado por los niveles más bajos de potencia en el histograma realizado, podemos observar que posee una media, $\mu_{\text{uhf}} = -69.41$ y una desviación estándar de $\sigma_{\text{uhf}} = -0.593$ (ver Figura 3.7). Estos parámetros nos permiten estimar un threshold de decisión consistente con las mediciones realizadas, ayudándonos a reducir la probabilidad de error, \mathcal{E} , y tener un resultado más preciso al obtener la ocupación de un canal.

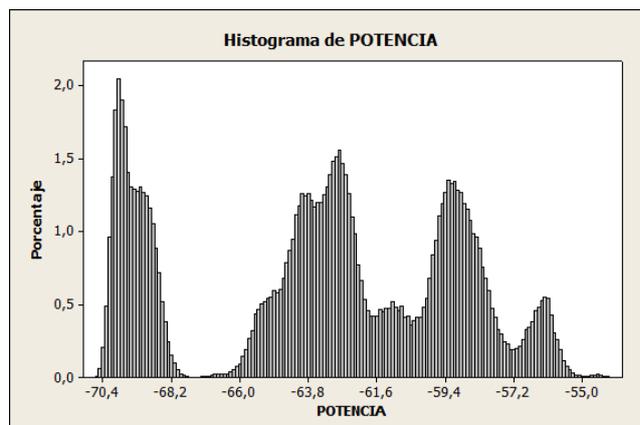


Figura 3.6. Distribución de probabilidades de las mediciones realizadas.

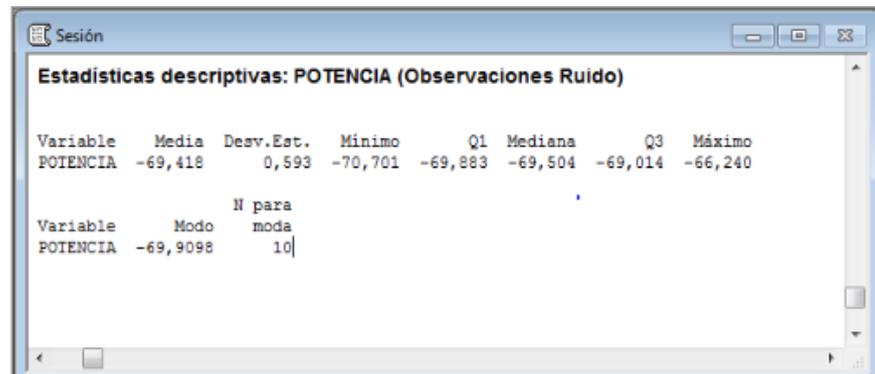


Figura 3.7. Estadísticas descriptivas de las mediciones realizadas.

3.4.3 Elección del treshold

Para el cálculo del treshold P_t , de decisión utilizamos la ecuación (2.21) correspondiente al ruido térmico equivalente para toda fuente de ruido, sobre el ancho de banda de medición que para nuestro caso fue definido en 600 MHz, considerando además de esto la figura de ruido, NF, del analizador de espectros y un margen de 9.97 dB el cual es un criterio establecido en el libro de recomendaciones de la ITU para contrarrestar las variaciones de la potencia de la señal transmitida a medida que varía su frecuencia, debido a que la medición se la realiza en todo el ancho de banda más no en un canal determinado. [22]

$$P_t = -174 \left(\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right) + \text{NF (dB)} + 10 \text{ dB} \quad (3.9)$$

Resolviendo la ecuación 3.9

$$P_t = -174 + 10\text{Log}(600000000) + 9.97 + 10$$

$$P_t = -66.24 \text{ db}$$

Las observaciones correspondientes al ruido, en la representación gráfica general Figura (3.6), confirman un comportamiento de normalidad con media -69,42 dBm. De esta manera, una práctica común es el establecimiento de límites ubicados a una distancia de 3 veces la desviación estándar con respecto a la media ($\mu \pm 3\sigma$), para identificar datos fuera de la condición estable de un proceso. Por lo tanto, se puede considerar adecuado el umbral definido inicialmente (-66,24 dBm), ya que no es menor que el límite inferior calculado a partir de los datos de ruido observados (-67,64 dBm).

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN Y MODELAMIENTO DE LA OCUPACIÓN DEL ESPECTRO.

Luego del procesamiento de las mediciones obtenidas el siguiente paso es el análisis de los datos procesados, y de esta manera poder caracterizar el comportamiento del espectro seguido del modelamiento de la ocupación del espectro.

La ocupación del espectro puede ser caracterizada por los parámetros que fueron determinados anteriormente como indicadores estadísticos de la disponibilidad de un determinado canal, la potencia de ruido, el ciclo de trabajo de un determinado canal que indica las veces en que un canal estuvo ocupado o desocupado.[19]

4.1 Determinación del ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo o duty cycle es una característica que permite conocer el porcentaje uso de una frecuencia determinada, en un tiempo establecido, para este proceso se ha utilizado el Software Matlab elaborando una función respecto a la Figura 4.1 que nos permita evaluar para cada frecuencia medida si la potencia supera o no el umbral determinado anteriormente de -66.24db.

```
for i=1: 189
for j=1: 1440
if Potencia(i,j) > -66.24
cont = cont + 1;
end
end
dutydian(i,1) = cont;
cont = 0;
end
dutyLunes = dutydian/1440
```

Figura 4.1 Función de obtención de duty cycle

En donde i , y j son contadores que permiten verificar cada elemento de la matriz de Potencia de orden 189×1440 y de esa forma compararlos con el valor del umbral, $duty_{dian}$ representa el n día en que se está realizando la medición y en esta matriz de orden 189×1 se almacenará cuantas veces el valor de potencia correspondiente a la frecuencia dada ha superado el umbral de decisión.

Por último se almacenarán en nueva matriz de orden 189×1 con nombre $duty$ (día de la semana) los resultados de la matriz $duty_{dian}$ divididos entre 1440, obteniendo valores entre 0 y 1 los cuales serán los representativos del duty cycle para cada frecuencia medida.

4.2 Análisis de ocupación del espectro

Una vez obtenidas las pruebas correspondientes al rango de frecuencias a medir se pueden realizar las gráficas pertinentes con el software Matlab y de esa manera poder verificar el comportamiento de las señales medidas, en esta sección se presenta la ocupación del espectro y el duty cycle correspondiente para analizar las características diarias de los canales estudiados.

A continuación se muestra un conjunto de resultados en los que se expone la utilización del espectro para diferentes días y en varios segmentos de frecuencias.

En la Figura 4.2 se puede apreciar la utilización del espectro del día lunes entre las 00:00 y 24:00 horas en el rango de frecuencias de 512 a 602MHz, para ello y en base al treshhold establecido de -66.24dB se ha definido una paleta de colores en la cual se puede determinar que las frecuencias que mantienen una coloración azul fuerte representan el momento cuando no se está transmitiendo información, es decir, la frecuencia se encuentra libre ya que a esta tonalidad se encuentra aproximadamente el treshhold establecido. En este caso específico de la gráfica mencionada se detecta que casi ninguna frecuencia presenta esta tonalidad, lo que indica que este segmento se encuentra bastante congestionado, a excepción del canal 31 correspondiente al rango de 572 a 578 MHz que con la ayuda de la Figura 4.3 correspondiente al duty cycle del mismo día lunes 00:00 a 24:00 se nota claramente que el porcentaje de ocupación del canal baja considerablemente.

Así en la Figura 4.4 del documento que detalla la utilización del espectro del día lunes entre las 00:00 y 24:00 horas pero en el rango de frecuencias de 602 a 698 MHz se detecta que una mayor parte de las frecuencias se encuentran con el tono azul fuerte, es decir, que para frecuencias más altas en el rango UHF asignado a la radiodifusión por televisión las mismas se encuentran libres, específicamente vemos este comportamiento en los canales del 44 al 47 y del 49 al 51, y en base a la información presentada por la SUPERTEL se confirma que no se encuentran concesionados por lo tanto es correcto que no se presentaría información en estas frecuencias.

También al revisar la Figura 4.5 correspondiente al duty cycle del día lunes en el rango de 602 a 698 MHz se visualiza que el porcentaje de uso de estos canales mantiene un valor cercano al 0%.

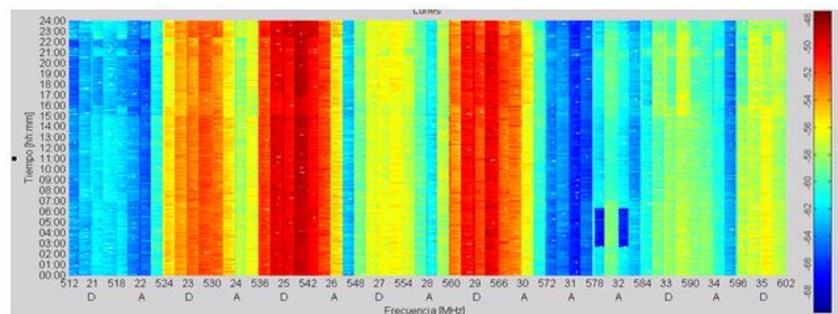


Figura 4.2 Utilización del espectro lunes 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

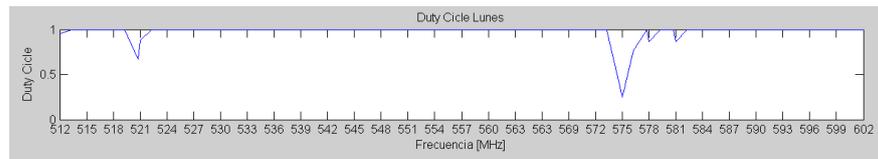


Figura 4.3 Duty cycle lunes 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

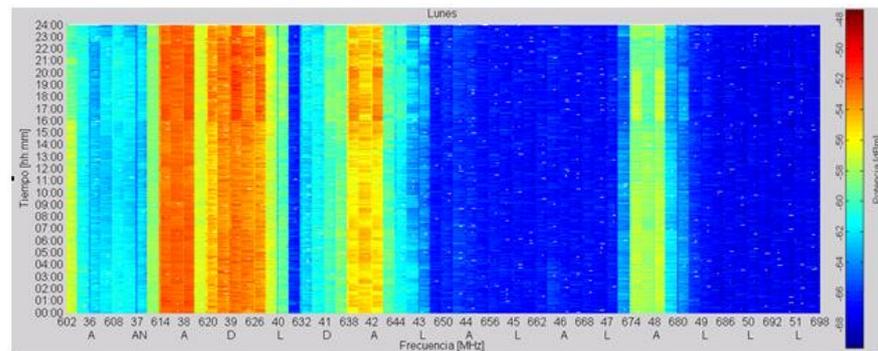


Figura 4.4 Utilización del espectro lunes 00:00 a 24:00
Frecuencias 602 – 698MHz

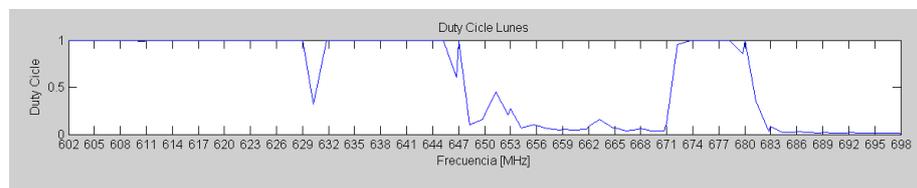


Figura 4.5 Duty cycle lunes 00:00 a 24:00
Frecuencias 602– 698MHz

En las siguientes figuras se muestran los canales estudiados desde el martes al domingo, en el cual se aprecia que el comportamiento es similar a lo largo de la semana para todos los canales de estudio

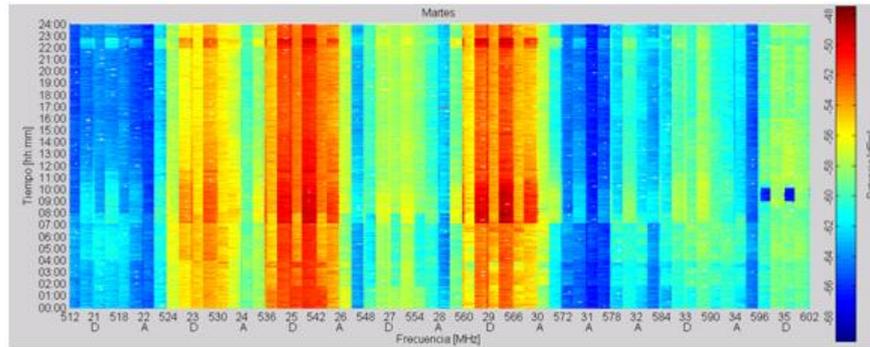


Figura 4.6 Utilización del espectro martes 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

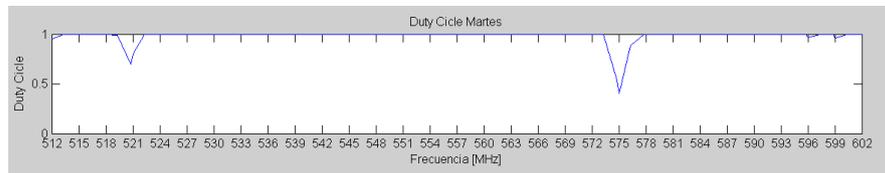


Figura 4.7 Duty cycle martes 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

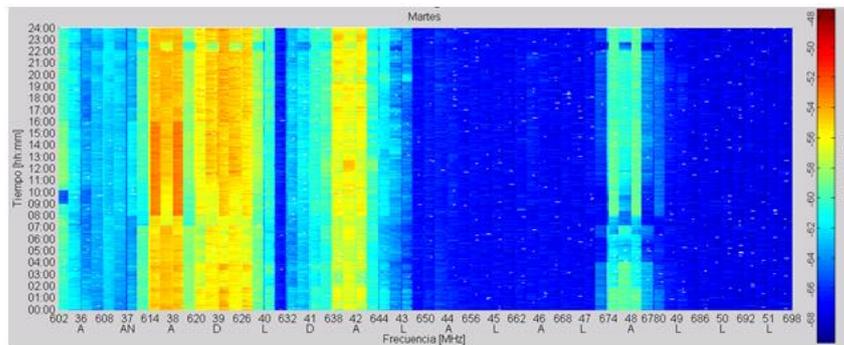


Figura 4.8 Utilización del espectro martes 00:00 a 24:00
Frecuencias 602 – 698MHz

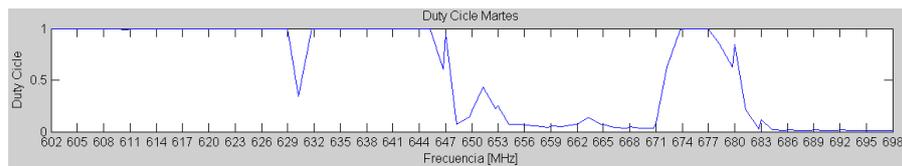


Figura 4.9 Duty cycle martes 00:00 a 24:00
Frecuencias 602– 698MHz

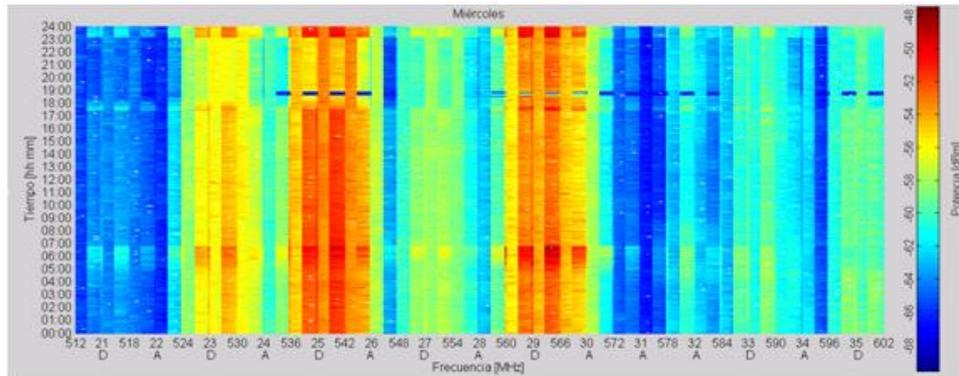


Figura 4.10 Utilización del espectro miércoles 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

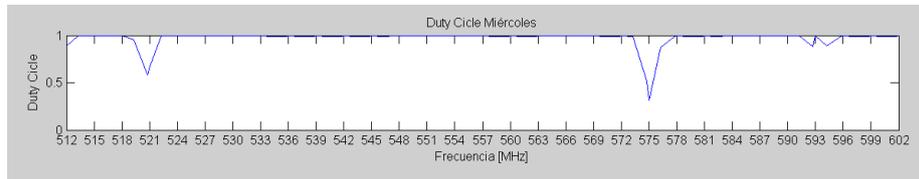


Figura 4.11 Duty cycle miércoles 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

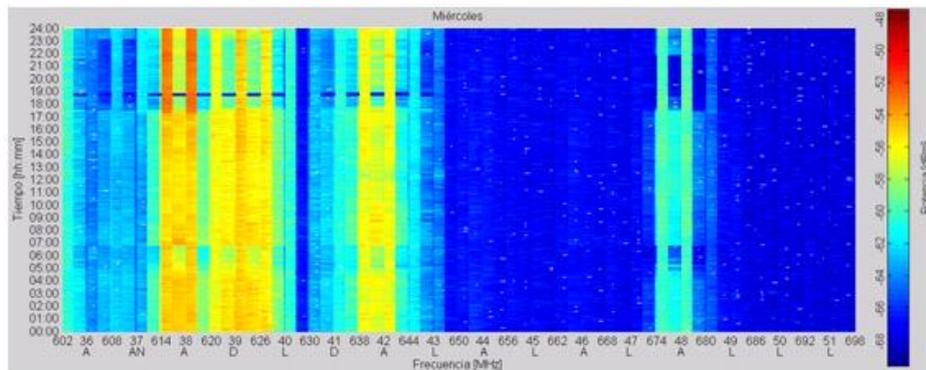


Figura 4.12 Utilización del espectro miércoles 00:00 a 24:00
Frecuencias 602 – 698MHz

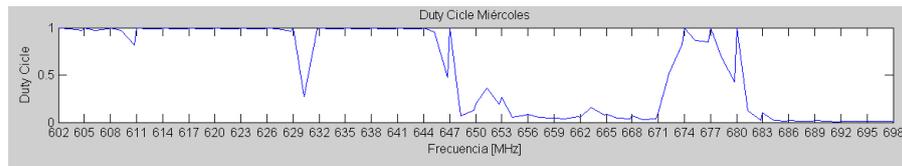


Figura 4.13 Duty cycle miércoles 00:00 a 24:00 Frecuencias 602– 698MHz

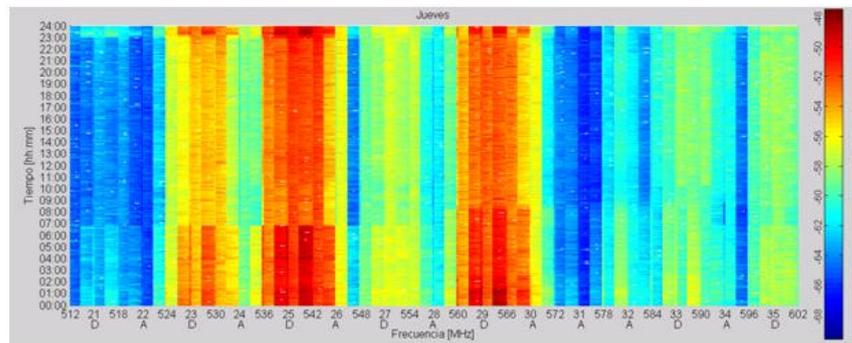


Figura 4.14 Utilización del espectro jueves 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz



Figura 4.15 Duty cycle jueves 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz

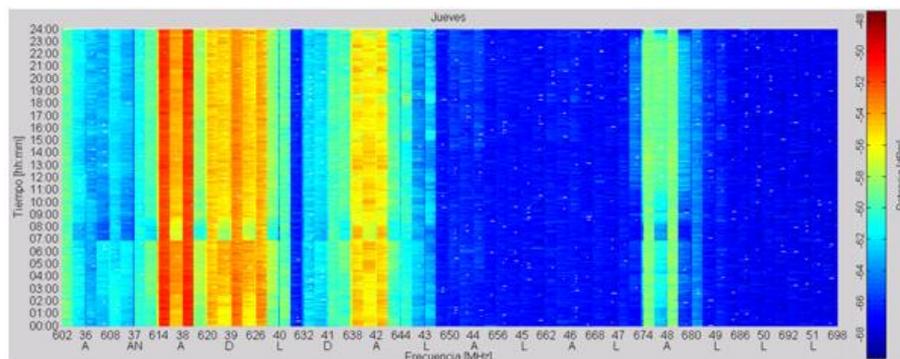


Figura 4.16 Utilización del espectro jueves 00:00 a 24:00 Frecuencias 602 – 698MHz

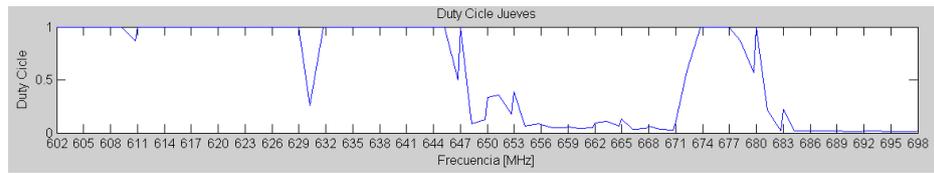


Figura 4.17 Duty cycle jueves 00:00 a 24:00
Frecuencias 602– 698MHz

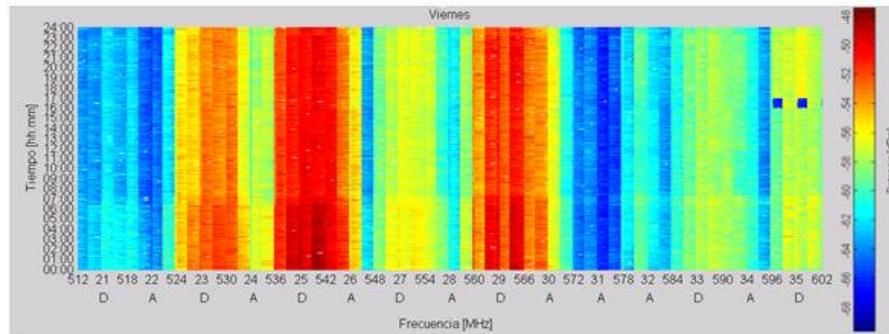


Figura 4.18 Utilización del espectro viernes 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

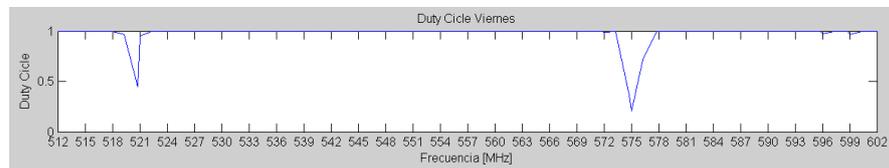


Figura 4.19 Duty cycle viernes 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

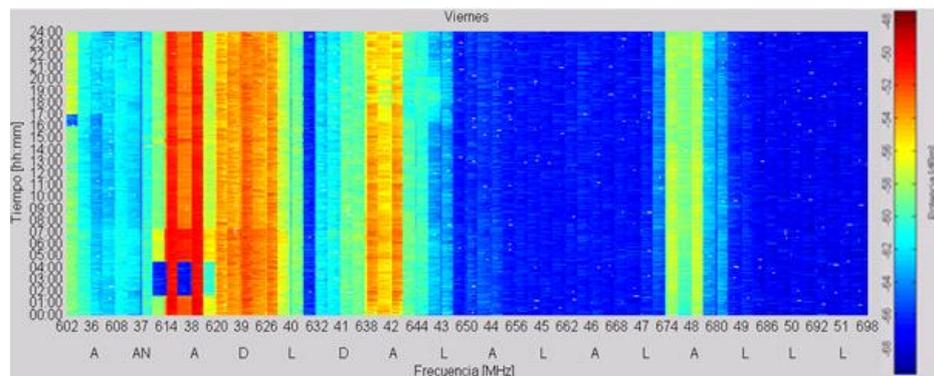


Figura 4.20 Utilización del espectro viernes 00:00 a 24:00
Frecuencias 602 – 698MHz

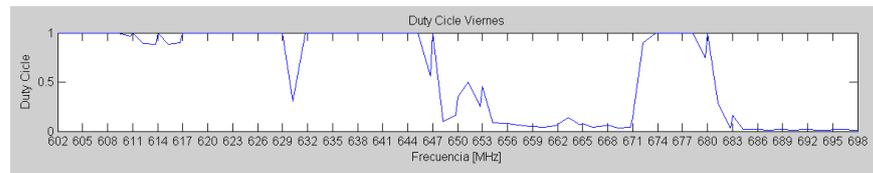


Figura 4.21 Duty cycle viernes 00:00 a 24:00 Frecuencias 602– 698MHz

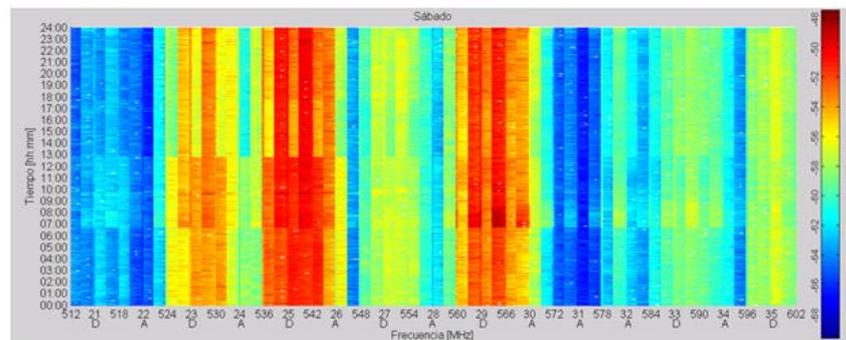


Figura 4.22 Utilización del espectro sábado 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz

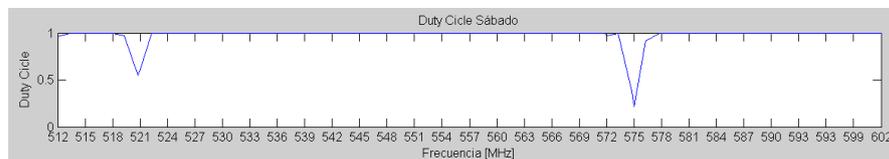


Figura 4.23 Duty cycle sábado 00:00 a 24:00 Frecuencias 512 – 602MHz

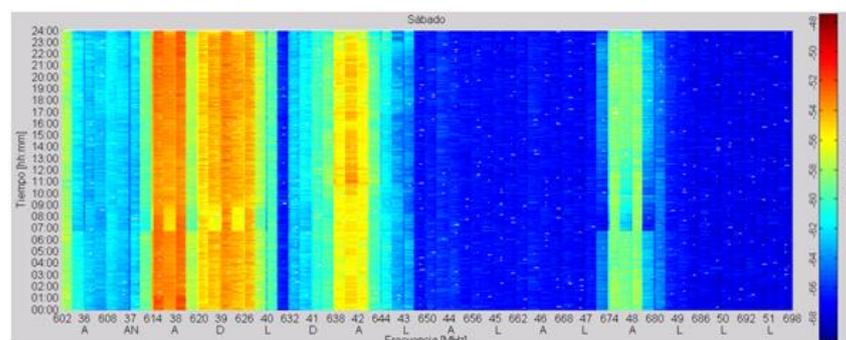


Figura 4.24 Utilización del espectro sábado 00:00 a 24:00 Frecuencias 602 – 698MHz

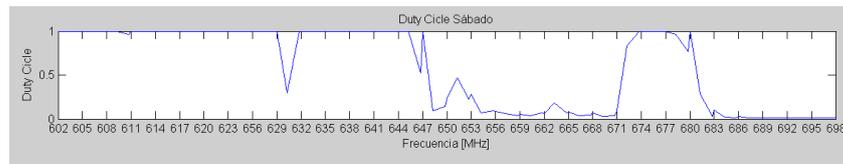


Figura 4.25 Duty cycle sábado 00:00 a 24:00
Frecuencias 602– 698MHz

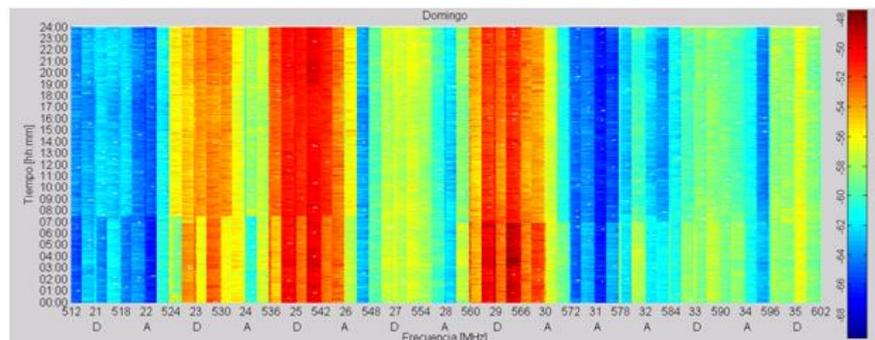


Figura 4.26 Utilización del espectro domingo 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

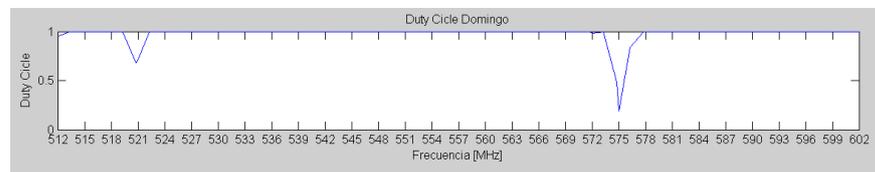


Figura 4.27 Duty cycle domingo 00:00 a 24:00
Frecuencias 512 – 602MHz

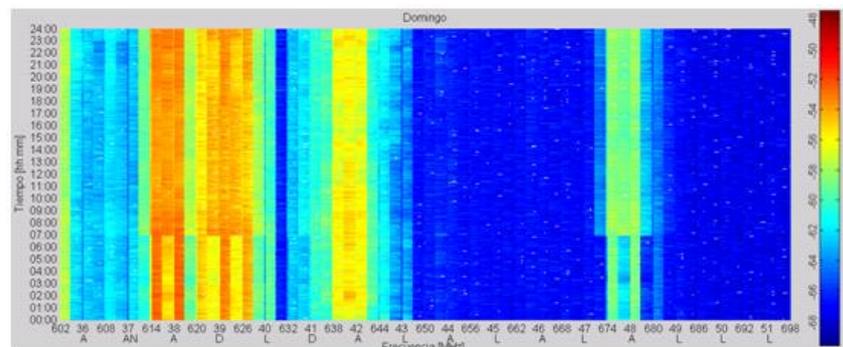


Figura 4.28 Utilización del espectro domingo 00:00 a 24:00
Frecuencias 602 – 698MHz

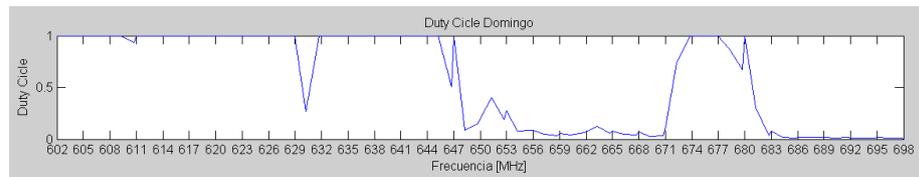


Figura 4.29 Duty cycle domingo 00:00 a 24:00
Frecuencias 602– 698MHz

Luego de verificar las gráficas obtenidas de uso del espectro y su correspondiente duty cycle, se puede concluir que en general los canales del 21 al 30 con rango de 512-572 MHz, del 32 al 42 con rango 578-644MHz y el canal 48 con rango 674-680 presentan una utilización de aparentemente del 100%, mientras que el canal 31 presenta menos del 50% de uso diario, lo que implica que el canal no es usado eficientemente manteniendo horas del día en que no transmite información y es aquí donde se pueden emplear sistemas radio cognitivos para mejorar la eficiencia de uso del espectro.

Adicional y tal como se mencionó en capítulos anteriores los canales 21, 23, 25, 27, 29, 33, 35, 39, 41 son canales digitales, esto puede ser corroborado observando las figuras de utilización del espectro ya que en los anchos de banda correspondientes a estos canales apreciamos que la coloración es casi uniforme lo que implica que las potencias de las

frecuencias pertenecientes a estos canales tienen un nivel constante por lo tanto los picos de estas señales tienen una mínima diferencia con las portadoras adyacentes, características de canales digitales.

En cambio para los canales analógicos 22, 24, 26, 28, 30, 31, 32, 34, 36, 38, 42, 44, 46, 48 no se mantiene una coloración uniforme y recordando que en una señal analógica las portadoras de video y audio están a 1.25 MHz y 5.75 MHz del inicio del canal respectivamente, se debería presentar mayor coloración en las proximidades de las frecuencia inicial y final del canal que efectivamente se presenta esta situación.

Pero se puede obtener una mejor representación de la utilización de los canales presentando gráficas del porcentaje de ocupación del canal directamente, esto verificando para canales digitales las veces en que la portadora digital supera el treshold y para canales analógicos corroborando cuantas veces la portadora de audio o la de video superan el treshold.

En las Figura 4.30 hasta la Figura 4.36 se representa el porcentaje de trabajo de los 31 canales a estudiar desde el día lunes al día domingo.

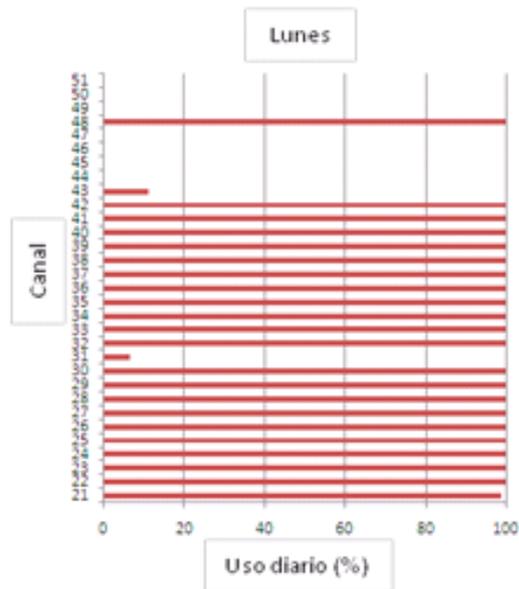


Figura 4.30 Porcentaje de uso por canal
Lunes

Tal como se intuía, en la Figura 4.30 se puede verificar que efectivamente el canal 31 presenta menos del 20% de uso el día lunes, así como también el canal 43, mientras que los canales del 21 al 30, 32 al 42 y el 48 se manifiestan con casi un 100% de uso, los espacios en blanco de los canales 44 al 47 y del 49 al 51 indican que están totalmente libres.

A continuación se verificará el comportamiento para los siguientes días y determinar si existe una continuidad en el uso de los canales.

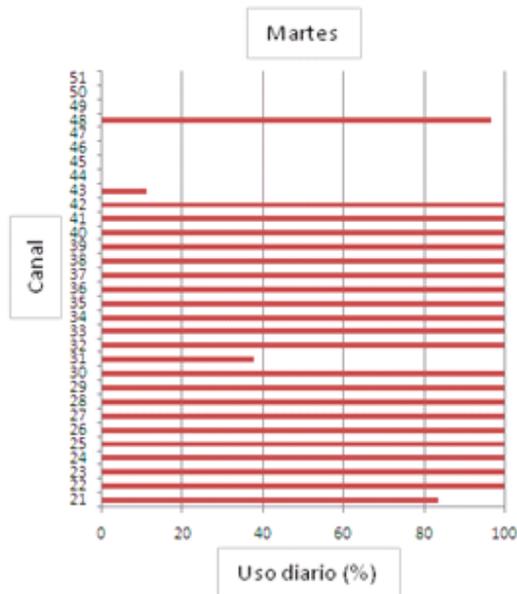


Figura 4.31 Porcentaje de uso por canal Martes

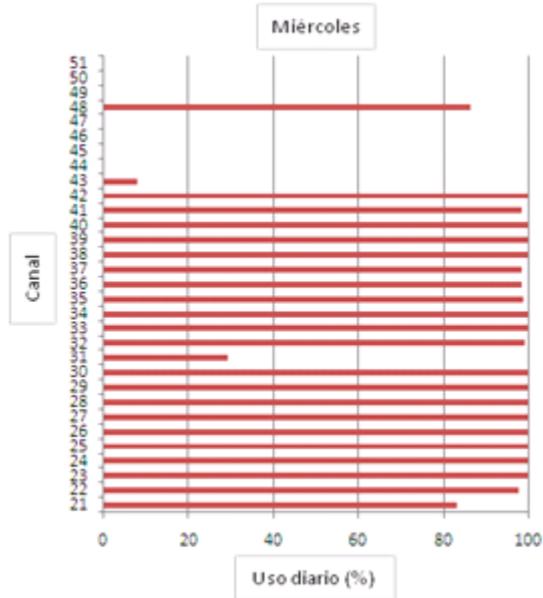


Figura 4.32 Porcentaje de uso por canal Miércoles

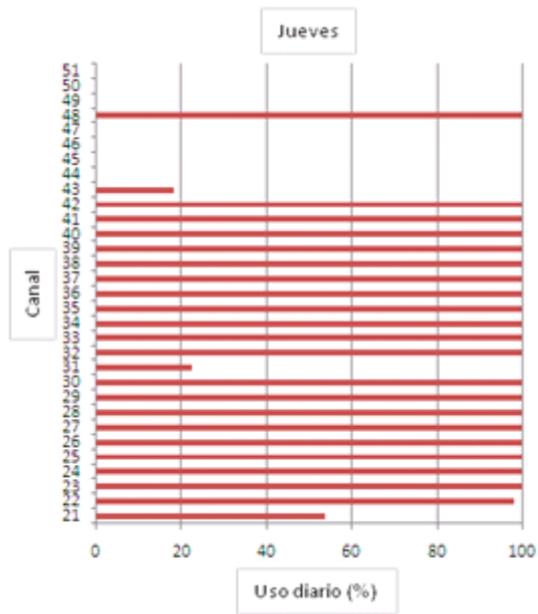


Figura 4.33 Porcentaje de uso por canal Jueves

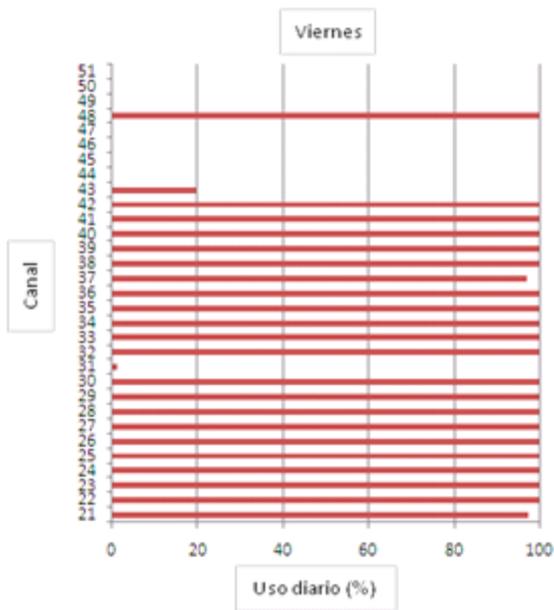


Figura 4.34 Porcentaje de uso por canal Viernes

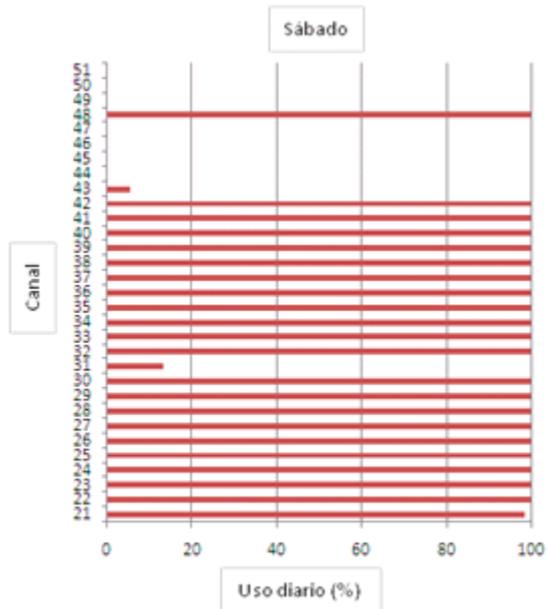


Figura 4.35 Porcentaje de uso por canal Sábado

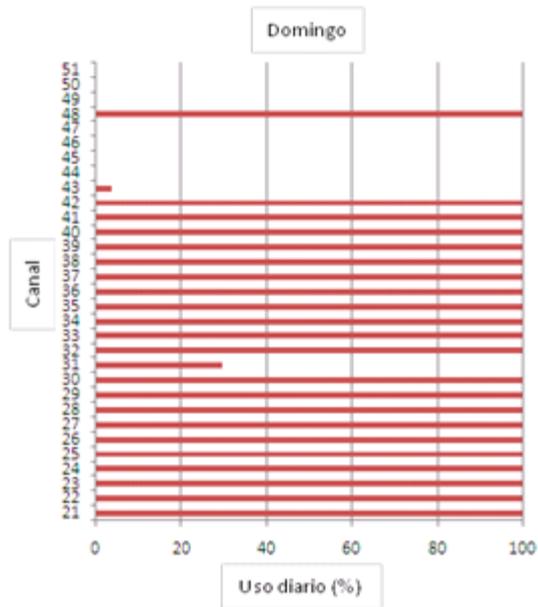


Figura 4.36 Porcentaje de uso por canal Domingo

Es evidente que el comportamiento ha sido similar a lo largo de los días medidos, esto confirmado por las figuras anteriores, por lo tanto con esta información se concluye que un canal adecuado para establecer un sistema de acceso dinámico puede ser el canal 31 cuyo uso diario no supera el 40%.

Como observación adicional se debería analizar con un grupo de pruebas más significativas el comportamiento del canal 21 el cual mantiene un uso casi del 100% de viernes a lunes pero en los demás días baja el porcentaje de uso percibiéndose una reducción del 20% los martes y miércoles y los jueves una reducción del 50% el jueves.

4.3 Modelo de la ocupación del espectro

Los parámetros que caracterizan la ocupación del espectro pueden ser incluidos en un modelo que permita determinar la disponibilidad de un canal de frecuencias en un instante determinado la cual es la base de los sistemas radio cognitivos.[23]

Se mantiene un escenario en donde se presentan un conjunto de observaciones acerca de la ocupación del espectro en base a las mediciones realizadas y se desea inferir acerca del estado siguiente de un canal, es por ello que es necesario analizar el comportamiento que tuvo el espectro en los instantes anteriores y encontrar parámetros estadísticos que permitan intuir sobre la disponibilidad de dicho canal. Existen dos posible estados que puede tener un canal, ocupado o desocupado. Según lo anteriormente mencionado se considera que la ocupación del espectro sigue un modelo de cadena de Markov finita ya que existen dos posibles estados de este parámetro. [23] Este capítulo complementa esta consideración en base a las mediciones realizadas durante 7 días, y la caracterización del espectro será realizada por canal.

4.3.1 Modelo Markoviano de la ocupación de la banda UHF (512 a 698 MHz).

El objetivo es conocer las probabilidades de los posibles estados de un canal para un tiempo futuro. Para armar el modelo markoviano se necesita de dos elementos principales, la matriz de transición de estados y el vector de estado inicial.

Sea X_n el vector de estados observables y Y_n el vector de estados ocultos, y considerando la asunción de Markov, en la cual se dice que los estados futuros del proceso markoviano no dependen de los estados pasados sino sólo del estado actual, el vector de probabilidades del estado oculto, para una determinada sucesión de estados s_1, \dots, s_{n+1} estaría dado por: [23]

$$P(Y_{n+1} = s_{n+1} | X_n = S_n) = P(X_n)A \quad (4.1)$$

En donde X_0 es el vector de probabilidades de estado inicial y A la matriz de probabilidades de transición de estados. En la Figura 4.37 podemos observar una representación gráfica de la cadena Markov del modelo en la cual se verifican los estados observables y ocultos, así como las probabilidades de transición las cuales determinan las probabilidades de un canal determinado de mantenerse en un mismo estado, ya sea ocupado o desocupado P_{00}, P_{11} , o de cambiar su estado en el próximo instante de tiempo, P_{10}, P_{01} . Según esto podemos reescribir la ecuación 4.1 como la siguiente: [23]

$$P(Y_{n+1} = s_{n+1} | X_n = S_n) = P(X_n) \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

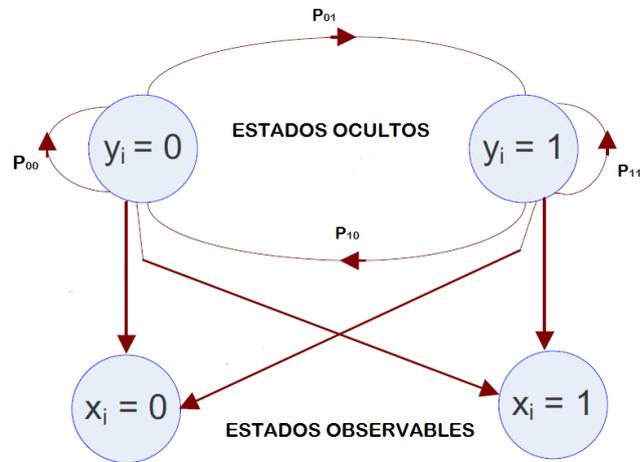


Figura 4.37. Diagrama de transición de estado de Markov. [23]

El procedimiento para calcular tanto el vector de estado inicial como la matriz de transición es usando los datos de las mediciones realizadas, en donde la sucesión de estados estaría dado por el estado de los canales, ya sea ocupado o desocupado, en cada intervalo de medición, que para el caso de este proyecto es de 1 min.

Como ejemplo se aplicará el modelo al canal 31, ya que como se ha venido estudiando y analizando, se presenta como un confiable candidato para un estudio de acceso dinámico al espectro.

A continuación se detallarán los códigos para elaborar el vector de probabilidades de estado inicial, y la matriz de transición del modelo de Markov correspondiente al canal 31, para de esta forma poder determinar las probabilidades del estado futuro de dicho segmento de frecuencias.

Se puede realizar un algoritmo sencillo a partir de las mediciones de potencia realizadas un vector que represente la ocupación de un determinado canal, comparando el nivel de potencia en todos los instantes de tiempo en el intervalo de medición con el treshold definido previamente. En la Figura 4.38 se muestra el cálculo del vector de probabilidades de estado inicial. $Pr_{statinit1}$ y $Pr_{statinit0}$ representan las probabilidades de que el estado inicial del canal 31 sea ocupado o desocupado respectivamente.

```

>> cont1=0;
cont2=0;
for j=1 : 10080
if b(1,j)>-66.24
cont1 = cont1 + 1;
else
cont2= cont2 + 1;|
end
end
prstatinit1= cont1/10080
prstatinit0= cont2/10080

prstatinit1 =

    0.1995

prstatinit0 =

    0.8005

>> disp(cont1)
    2011

>> disp(cont2)
    8069

```

Figura 4.38. Vector de probabilidades de estado inicial canal 31

Para obtener la matriz de transición de Markov se utiliza los algoritmos detallados en las Figuras 4.39, 4.40, 4.41 y 4.42, en donde se definen las probabilidades de que el canal permanezca ocupado P_{11} , de que permanezca desocupado P_{00} , de que ocurra una transición del estado desocupado al estado ocupado P_{01} y de que ocurra una transición del estado ocupado al estado desocupado P_{10} respectivamente.

```

>> cont1=0;
for j=1 : 10079
if b(1,j)>-66.24
if b(1,j+1)>-66.24
cont1 = cont1 + 1;
end
end
end
P11= cont1/2011

P11 =

    0.7330

```

Figura 4.39. Probabilidad de transición del estado ocupado al estado ocupado del canal 31.

```

>> cont1=0;
for j=1 : 10079
if b(1,j)<-66.24
if b(1,j+1)<-66.24
cont1 = cont1 + 1;
end
end
end
disp(cont1)
P00= cont1/8069
    7531

P00 =

    0.9333

```

Figura 4.40 Probabilidad de transición del estado desocupado al estado desocupado del canal 31

```

>> cont1=0;
for j=1 : 10079
if b(1,j)<-66.24
if b(1,j+1)>-66.24
cont1 = cont1 + 1;
end
end
end
disp(cont1)
P01= cont1/8069
    537

P01 =

    0.0666

```

Figura 4.41 Probabilidad de transición del estado desocupado al estado ocupado del canal 31

```

>> cont1=0;
for j=1 : 10079
if b(1,j)>-66.24
if b(1,j+1)<-66.24
cont1 = cont1 + 1;
end
end
end
disp(cont1)
P10= cont1/2011
    537

P10 =

    0.2670

```

Figura 4.42 Probabilidad de transición del estado ocupado al estado desocupado del canal 48.

El vector de probabilidades del estado siguiente de la cadena de Markov estaría dado por el producto de la probabilidad de estado inicial con la matriz de transición anteriormente determinada como se muestra en la Figura 4.43.

```
>> Xo= [prstatinit0 prstatinit1]
Xo =
    0.8005    0.1995
>> A = [P00 P01; P10 P11]
A =
    0.9333    0.0666
    0.2670    0.7330
>> PYn=Xo*A
PYn =
    0.8004    0.1995
```

Figura 4.43 Probabilidad de estado siguiente del canal 31.

Los elementos del vector obtenido representan las probabilidades de que el canal 31 se encuentre ocupado o desocupado en base al espacio de estados observables obtenido de las mediciones continuas realizadas durante los 7 días. Como se observa en la ecuación 4.3 la probabilidad de que el canal 31 se encuentre

desocupado en su estado siguiente es del 80.04%, mientras que la probabilidad de que esté ocupado es del 19.95%.

$$P(Y_n) = P(S_1 = i) A = (0.8004 \ 0.1995) \quad (4.3) \quad [23]$$

Por lo tanto podemos destacar que es factible subutilizar el canal 31 debido a la alta disponibilidad que presentó en todo el intervalo de tiempo en que se realizaron las mediciones.

De esta misma manera en que se ha realizado el estudio para el canal 31, se puede analizar los modelos para los demás canales, sin embargo es claro notar que la efectividad del modelo es aplicada a los canales que presentan una mayor disponibilidad.

CONCLUSIONES

1. El analizador de espectros Agilent E4404B en conjunto con la herramienta Intuilink, nos permitieron documentar en un archivo de Excel las muestras de la señales de potencia con respecto al rango de frecuencias de 512 MHz a 698 MHz, para cada minuto durante los siete días de medición, lo cual nos facilitó la labor de ordenar los datos para su posterior su análisis.
2. Con el análisis del duty cycle o ciclo de trabajo realizado en el capítulo 4, se puede mencionar que los canales 45,47,49,50 y 51 de la banda

3. UHF asignados para el servicio de radiodifusión por TV, se consideran totalmente disponibles para su uso según las mediciones de la semana del 22 al 28 de diciembre del pasado año 2014, ya que los niveles de potencia de la señal no superaron el treshold definido durante todo el intervalo de medición. Mientras que los canales 22 y 40 presentan un porcentaje de ocupación entre 40 y 60 %, los cuales pueden ser aprovechados por los usuarios secundarios en los instantes de tiempo en que los concesionarios legales de dichas frecuencias o usuarios primarios se encuentren transmitiendo.

4. Las cadenas de Markov permitieron modelar la ocupación de un canal de frecuencias debido a que los parámetros que caracterizan la disponibilidad del mismo siguen el modelo estadístico mencionado, y en base a esto se puede inferir acerca de la disponibilidad futura de un canal según las probabilidades de la matriz de transición de estados obtenida a partir de las mediciones realizadas y las probabilidades del estado inicial que posea.

5. No se puede asegurar que existe un menor porcentaje de ocupación del espectro en horas de la madrugada donde se espera que los canales de TV abierta dejen de transmitir su programación habitual debido a la baja demanda de los televidentes por el horario mencionado, ya que según el histograma de potencias con respecto al tiempo sólo el canal 38 presentó disponibilidad el día viernes 26 en el horario de 02:00H a 04:00H am.

RECOMENDACIONES

1. En la fórmula del ruido térmico para el cálculo del treshold se debe considerar además de las fuentes de ruido del sistema el margen de 10 dB que recomienda la ITU sumarle a dicho umbral, lo cual nos permite contrarrestar las variaciones de potencia que sufre la señal con respecto a su frecuencia.
2. Se recomienda llevar un control cauteloso de las mediciones realizadas al momento de esperar que se completen las 8 horas de medición y guardar los datos en un nuevo documento de Excel,

ya que podemos olvidar este paso y tener instantes de tiempo sin medición o falsos espacios en blanco; o en su defecto presentarse inconvenientes como pérdida de energía en el sector donde se encuentra el analizador de espectros y no poder seguir recolectando los datos.

3. El análisis para determinar la ocupación del espectro se lo debe realizar con los valores de potencia a la entrada de la antena receptora, es decir que a los valores obtenidos del analizador de espectros le debemos sumar las pérdidas por atenuación en el cable y conectores y restar la ganancia de la antena en el caso de que la posea, ya que el análisis debe servir para cualquier tipo de receptor.

4. Se recomienda utilizar el software estadístico Minitab para el análisis estadístico de las mediciones para el cálculo de la media, variancia e histogramas, y por ende tener una mejor visualización de los datos que con los que se está trabajando.

5. Para el procesamiento de los datos previamente se los debe ordenar para poderlos utilizar softwares como Matlab y Minitab, para ello se recomienda el uso de macros que facilitan el manejo de los mismos en Excel.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ramón Agustí Comes, Francisco Bernardo Álvarez, Fernando Casadevall Palacio, Ramón Ferrús Ferré. LTE: Nuevas Tendencias en comunicaciones Móviles. Fundación Vodafone España, 2010.
- [2] National Telecommunications and Information Administration, Commerce Spectrum Management Advisory Committee (CSMAC). Definitions of Efficiency in Spectrum Use, 2008.
- [3] SUPERTEL. Concesionarios de estaciones de televisión abierta analógica y digital terrestre en el ámbito nacional ordenados por provincia. Documento de la página web de la Superintendencia de Telecomunicaciones, Octubre 2014.
- [4] UIT. Reglamento de Radiocomunicaciones, Preámbulo 0.3, Capítulo II, Artículo 4.1, Asignación y empleo de las frecuencias, 2012.
- [5] Javier Luque Ordoñez. Espectro Electromagnético y Espectro Radioeléctrico. Publicación, ACTA, Autores-Científica-Técnicos y Académicos, 2012.

- [6] Allan H. Treiman. ALTA Reflectance Spectrometer Introduction And Classroom Lessons. Curriculum, Lunar and Planetary Institute, 2000.
- [7] Secretaria Nacional de Telecomunicaciones. Programas y Servicios, Frecuencias, 2014. Recuperado de:
http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/frecuencias_senatel/
- [8] Abdollah Ghasemi, Ali Abedi, Farshid Ghasemi. Propagation Engineering in Wireless communications, Chapter 2 Basic Principles in Radiowave Propagation, 2012.
- [9] Wolfgang Rueckner. Shot and Thermal Noise. Harvard College, 2014.
Recovery from:
http://www.fis.unipr.it/~gigi/dida/strumentazione/harvard_noise.pdf
- [10] Alvarez Córdova Roxana y Morán Mazzini Douglas. Implementación de Sistemas de Difusión de Audio y Video en 470 MHz para la FIEC y 5.8 GHz para el CTI y Tutorial del Diseño de los Radioenlaces Implementados, Tesis de Grado Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005.

- [11] Consejo Nacional de Radiodifusión y Televisión. Norma técnica para el servicio de televisión analógica y plan de distribución de canales (Resolución No. 1779-CONARTEL-01), 2014. Recuperado de:<http://www.advicom.ec/userFiles/files/Regulacion/Norma%20Tecnica%20Ecuador-Servicio%20de%20Television%20Analogica%20CONARTEL%20%282001%29.pdf>
- [12] Rodríguez Rodríguez David Leonardo, Valencia Delgado Roberto Javier. Evaluación de los Estándares Digitales que Actualmente usan las Operadoras de Audio y Video por Suscripción. Tesina de Seminario Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2013.
- [13] CONATEL, Plan Nacional de Frecuencias Ecuador. Recuperado dehttp://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2013/07/plan_nacional_frecuencias_2012.pdf
- [14] Advanced Television Systems Committee. ATSC Standard for Transmitter Synchronization, 2011. Recovery from http://www.atsc.org/cms/standards/a_110-2011.pdf

- [15] Asociación Brasileira de Normas Técnicas. Televisión Terrestre-Sistema de Transmisión. ABNT 1era Ed, 2007. Recuperado de: http://www.advicom.ec/userFiles/files/Normas/ABNT%20NBR%2015601_2007Esp_2008-TDT-Sistema%20de%20Transmision.pdf
- [16] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohnty. Next Generation/ Dynamic Spectrum Access/ Cognitive Radio Wireless networks. Paper of Georgia Institute of Tecnology, 2006.
- [17] S. Haykin. Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications. Journal on Selected Areas in Communications, IEEE, 2005.
- [18] A.T. Bharucha-Reid. Elements Of The Theory of Markov Processes And Their Applications. McGraw Hill Series in Probability and Statistics, 1960.
- [19] Dinesh Datla, Alexander M. Wyglinsk, Gary J. Minden. A Spectrum Surveying Framework for Dynamic Spectrum Access Networks, IEEE Journal on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 8, 2009.

- [20] ZhiQuan, Wenyi Zhang, Stephen J. Shellhammer, Ali H. Sayed. Optimal Spectral Feature Detection for Spectrum Sensing at Very Low SNR, IEEE Transactions on Communications, Vol 59, No 1, 2009
- [21] Spectrum Occupancy Investigation: Measurements in South Africa S.D Barnes, P.A. Jansen van Vuuren, B.T. Marahaj. Universty of Pretoria, 2009.
- [22] Radiocomunication Bureau, Handbook Spectrum Monitoring. International Telecommunication Union (ITU), 2002.
- [23] ChittabrataGhost, Carlos Cordeiro, Dharma P Agrawal, M. Bhaskara Rao. Markov Chain Existence and Hidden Markov Models in Sepctrum Sensing, IEEE Invited Paper, 2009.