



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“DISEÑO DE UN ALGORITMO DE PREDICCIÓN DE
CANALES DISPONIBLES EN EL RANGO DE
FRECUENCIA ASIGNADA A TELEVISIÓN BASADO EN
EL MÉTODO OCULTO DE MARKOV PARA LOGRAR
ACCESO DINÁMICO AL ESPECTRO EN AMBIENTES
INDOOR EN ZONAS URBANAS”

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

JACOB JOSÉ TRIANA VERA

ANDY GABRIEL MERA SARCO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por acompañarme en este largo trayecto y permitirme cumplir con una de mis metas, agradecer también a mis familiares y amigos en especial a mis padres Johnny Triana Paredes y Sonia Vera Barzola por haberme brindado una buena educación, inculcarme disciplina y perseverarían para no rendirme en momentos apremiantes; por brindarme en todo momento su apoyo incondicional a pesar de los obstáculos que se atravesaron en el transcurso de esta etapa. Gracias a todas sus enseñanzas pude lograr con éxito culminar mi carrera.

Jacob José Triana Vera

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres por el apoyo brindado durante el transcurso de esta etapa universitaria, dándome ánimo frente a los diversos obstáculos presentados aconsejándome para poder superarlos de la mejor manera, a mi familia y amigos quienes me brindaron su confianza y palabras de superación con el fin de poder culminar mi carrera.

Jacob José Triana Vera

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN

.....
Ing. Washington Medina Moreira

PROFESOR DE MATERIA
INTEGRADORA

.....
Ing. Juan Romero Arguello

TUTOR ACADÉMICO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

.....
Jacob José Triana Vera

.....
Andy Gabriel Mera Sarco

RESUMEN

Este proyecto está enfocado en el diseño de un algoritmo para n canales conjuntos en la banda de televisión que permite el análisis predictivo de disponibilidad en canales conjuntos con la finalidad de asistir en el uso óptimo de sistemas de acceso oportunistas al espectro, los cuales son de gran utilidad para solventar la problemática que se ha presentado en los últimos años en cuanto a la saturación del espectro radioeléctrico. Este algoritmo brinda posibilidades de reutilización del espectro en la banda de televisión para el rango de canales del 19 al 49 y así disminuir el tráfico de datos. Este proyecto está basado en mediciones reales realizadas en un edificio dentro del centro de la ciudad de Guayaquil las cuales se midieron en [dBm] durante una semana.

El diseño del proyecto está estructurado e implementado en base al Modelo oculto de Markov, el cual da como resultado una serie de secuencias basados en parámetros asociados al análisis de las muestras usadas en el código. Para la simulación se usa la herramienta MATLAB.

Los resultados de este proyecto permiten graficar los comportamientos de la predicción para n canales conjuntos y compararlo con los datos reales para cada día de medición. Obteniendo una efectividad de predicción para los mejores casos mayor al 95% y una efectividad del 65% para muestras con mucha variabilidad de estados de disponibilidad. Por consiguiente se puede decir que el Modelo usado se ajusta con mayor efectividad en días con poca variación en la disponibilidad a lo largo del día.

ABSTRACT

This project is focused in the design of an algorithm for n joint channels in the television band that allows the predictive analysis of availability in joint channels with the purpose of assisting in the optimal use of opportunistic access systems to the spectrum, which are of great utility to solve the problems that have arisen in recent years in terms of saturation of the radio spectrum. This algorithm offers possibilities of reuse of the spectrum in the television band for the range of channels from 19 to 49 and thus decrease data traffic, this project is based on real measurements made in a building within the center of the city of Guayaquil, which were measured in [dBm] for a week.

The design of the project is structured and implemented based on the Hidden Markov Model, which results in a series of sequences based on parameters associated with the analysis of the samples used in the code. The MATLAB tool is used for the simulation.

The results of this project allow to graph the prediction behaviors for n joint channels and compare it with the real data for each day of measurement. Obtaining a prediction effectiveness for the best cases greater than 95% and an effectiveness of 65% for samples with a high variability of availability states. Therefore, it can be said that the model used adjusts more effectively on days with little variation in availability throughout the day.

ÍNDICE GENERAL

RESUMÉN.....	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
Abreviaturas	x
SIMBOLOGÍA.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
1. Aspectos generales.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivo específico.....	6
1.4 Metodología.....	6
1.5. Estado del Arte	7
1.6 Alcance	9
1.7 Limitaciones	10
CAPÍTULO 2.....	12
2 Marco Teórico	12
2.1 Espectro Radioeléctrico.....	12
2.1.1 Conceptos Técnicos	13
2.2 Gestión del Espectro Radioeléctrico.....	14
2.2.1 Regulación del Espectro	15
2.3 Acceso Oportunista al espectro	16
2.3.1 Arquitectura de una red OSA	17
2.3.2 Radio Cognitiva	17
2.4 TVWS.....	20

2.4.1 Estandarización	21
2.5 Televisión analógica	21
2.6 Cadenas de Markov	22
2.6.1 Conceptos básicos.....	22
2.7 Modelo Oculto de Markov.....	23
2.7.1 Arquitectura de un modelo oculto de Markov	24
CAPÍTULO 3.....	26
3. Modelamiento del proyecto	26
3.1 Descripción	26
3.2 Disponibilidad de canales	26
3.3 Canales conjuntos	28
3.4 Modelamiento del algoritmo predictivo.....	29
3.4.1 Vector inicial (π)	29
3.4.2 Matriz de transición (A)	30
3.4.3 Matriz de emisión.....	31
3.5 Análisis del tamaño de la muestra de datos observables	32
3.6 Algoritmo de predicción	33
CAPÍTULO 4.....	36
4. Análisis de Resultados.....	36
4.1 Análisis para encontrar el día de mejor y peor predicción.....	36
4.2 Resultados	41
Conclusiones	46
Recomendaciones.....	47

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
OSA	Acceso Oportunista al Espectro
CC	Canal Conjunto
DSA	Acceso Dinámico al Espectro
TVWS	TV White Space
M2M	Máquina a máquina
GT	Grupo de Trabajo
TV	Televisión
NTSC	National Television System Committee
PAL	Phase Alternating Line
ATSC	Advanced Television System Committee
DVB-T	Digital Video Broadcasting Terrestrial
DTMB	Digital Television Terrestrial Broadcasting
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
PDF	Función de distribución de probabilidad
HMM	Hidden Model Markov

SIMBOLOGÍA

dBm	Decibelio milivatio
VLf	Very Low Frecuency
LF	Low Frecuency
MF	Medium Frecuency
HF	High Frecuency
VHF	Very High Frecuency
UHF	Ultra High Frecuency
SHF	Super High Frecuency
EHF	Extremely High Frecuency

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Acceso al Internet según área [4].....	1
Figura 1.2 Porcentaje de celular activado por área [4]	2
Figura 1.3 Acceso dinámico al espectro [7]	4
Figura 2.1 Regulación Jerárquica del Espectro Radioeléctrico [14].	15
Figura 2.2 Arquitectura modelo Oculto de Markov [22]	24
Figura 3.1 Diagrama de flujo para disponibilidad de canales.	27
Figura 3.2 Diagrama del algoritmo de predicción.	35
Figura 4.1 Porcentaje de error en predicción de 2 CC día Miércoles.	37
Figura 4.2 Porcentaje de error en predicción de 2 CC día Jueves.	37
Figura 4.3 Porcentaje de error en predicción de 3 CC día Miércoles.	38
Figura 4.4 Porcentaje de error en predicción de 3 CC día Jueves.	38
Figura 4.5 Porcentaje de error en predicción de 2 CC día Martes.....	39
Figura 4.6 Porcentaje de error en predicción de 2 CC día Miércoles.	39
Figura 4.7 Porcentaje de error en predicción de 3 CC día Martes.....	40
Figura 4.8 Porcentaje de error en predicción de 3 CC día Miércoles.	40
Figura 4.9 Comportamiento de canales conjuntos predichos desde 2CC hasta 7CC.	41
Figura 4.10 Comportamiento para 2CC disponibles.....	42
Figura 4.11 Comportamiento para 3CC disponibles.....	43
Figura 4.12 Comportamiento para 4CC disponibles.....	43
Figura 4.13 Comportamiento para 5CC disponibles.....	44
Figura 4.14 Comportamiento para 6CC disponibles.....	44
Figura 4.15 Comportamiento para 7CC disponibles.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Bandas de frecuencias.....	13
Tabla 3.1 Canales conjuntos forma en que se agrupan.	28
Tabla 3.2 Cantidad de combinaciones de canales conjuntos.	29
Tabla 3.3 Análisis de efectividad matriz de transmisión por rango día martes.	33

CAPÍTULO 1

1. Aspectos generales

1.1 Planteamiento del problema

Hoy en día el espectro radioeléctrico está cada vez más copada de información debido a la alta demanda de dispositivos, esto nos da a entender que en algún momento habrá un serio congestionamiento en las redes de comunicación. Es por esto que la reutilización del espectro ha estimulado diferentes actividades en ingeniería, economía y entidades de regulación en la búsqueda de una mejor gestión, esta reutilización se basa en identificar canales de transmisión que se encuentren desocupados dentro del rango de frecuencia para una óptima distribución por consiguiente la tecnología de Radio Cognitivo empezó a tomar fuerza en diversos ámbitos de los sistemas de radio; ya que se enfoca en el uso eficiente del espectro [1, 2, 3].

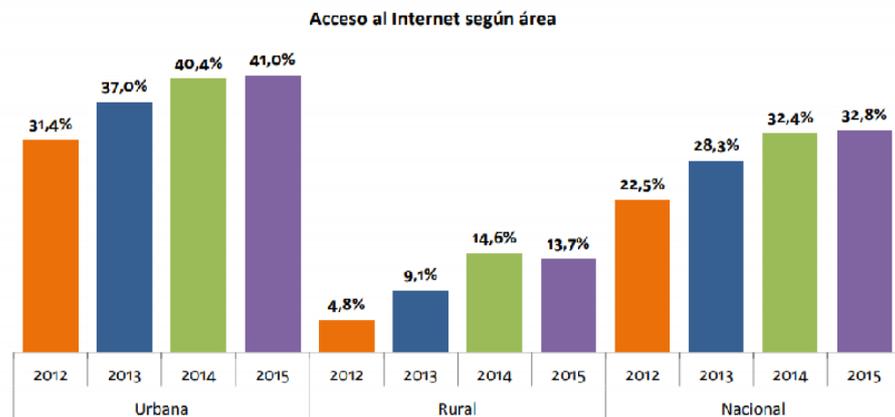


Figura 1.1 Acceso al Internet según área [4].

Mediante la figura 1.1 se puede observar el crecimiento que ha ocurrido entre los años 2012-2015 a nivel nacional y un pequeño desglose entre zona Urbana y zona rural en Ecuador sobre el acceso a internet, se puede concluir que el área urbana es la más afectada con esta

problemática llevándonos a confirmar la posible demanda que podría existir en años posteriores.

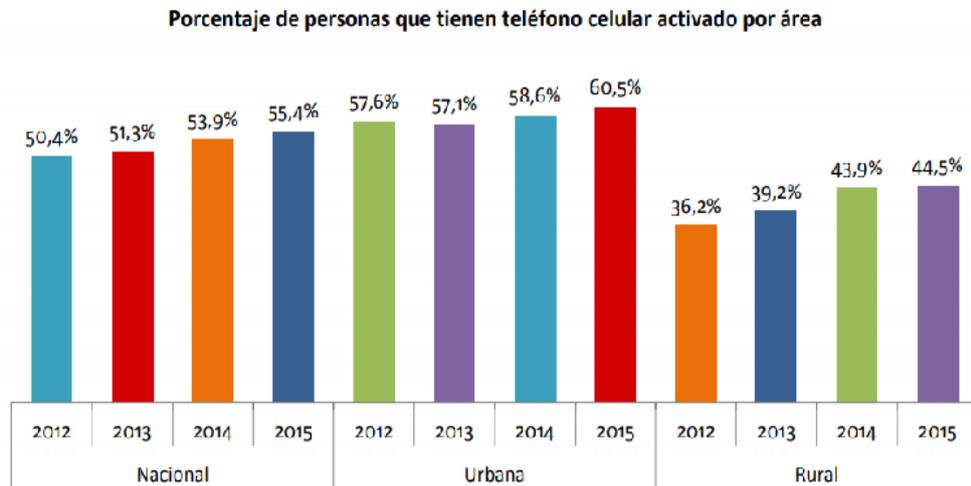


Figura 1.2 Porcentaje de celular activado por área [4].

Para la figura 1.2 se muestra mediante un gráfico estadístico el crecimiento de dispositivos móviles en uso durante los años 2012-2015 en Ecuador, se observa un patrón casi similar al de la figura 1.1 concluyendo que de igual manera para el área urbana el uso de celular es mayor y va en crecimiento ocasionando incremento en la saturación del espectro.

Como hemos podido observar en las gráficas anteriores existe un gran incremento de tecnologías que necesitan estar en constante interacción con las redes mediante acceso inalámbrico sumada a la carencia de disponibilidad de un espectro limitado, específicamente en ambientes indoor dentro de una zona urbana en donde la ocupación del espectro varía dependiendo del día, cantidad de usuarios y hora. También se debe tener en cuenta que hoy en día aún no se logra distribuir de una manera óptima dicho espectro que actualmente es asignado de forma estática. De esta manera una gran cantidad de dispositivos conectados inalámbricamente de manera simultánea genera una saturación en los

rangos de frecuencias licenciados y no licenciados produciendo posibles pérdidas de paquetes de datos que a su vez podría ocasionar retrasos al momento de recibir información o deficiencia del servicio brindado por parte de las operadoras o proveedor de internet a tal punto de no poder acceder a la red inalámbrica en ciertos momentos [1, 5].

También se debe mencionar el crecimiento exponencial que está teniendo el mercado con respecto a dispositivos con capacidad de conexión inalámbricas lo que da como resultado una mayor ocupación del espectro a medida que pasa el tiempo; hoy en día para mitigar levemente este problema ciertos de usuarios optan por limitar el número de dispositivos conectados o el tiempo en que puedan permanecer conectados a la red. Esto se da más en las bandas no licenciadas ya que son compartidas por un gran número de usuario y al no tener un control que regule la instalación de dispositivos inalámbricos que operen en dichas bandas hace que se presenten niveles de interferencia entre ellos produciendo los problemas antes mencionados. En el caso de los que hacen uso de las bandas licenciadas como las operadoras telefónicas se produce un colapso en las llamadas o interferencias a pesar de tener bandas exclusivas para este servicio [4, 6].

Se puede concluir que el desarrollo vertiginoso de las comunicaciones inalámbricas tanto en bandas licenciadas y no licenciadas, ha dado como consecuencia una saturación del espectro radioeléctrico, produciendo congestión en los rangos de frecuencia en los cuales operan, teniendo como resultado poca calidad en el servicio.

1.2 Justificación

Debido a los problemas antes mencionados surge la necesidad de encontrar posibles soluciones para enfrentar este tipo de

acontecimientos, una de las posibilidades que ha surgido como solución en los últimos años ha sido el uso de mecanismos o técnicas denominadas DSA (Dinamic Spectrum Access). Un sistema DSA permite el acceso al espectro mediante ciertas condiciones específicas y de manera ordenada según la topología de la red. El presente proyecto pretende dar un aporte al sistema antes mencionado con un análisis predictivo de los canales conjuntos disponibles. Para ello surge la idea de crear un algoritmo que nos permita predecir que canales conjuntos están disponibles para ser usados en intervalo de tiempo específico, sin interferir en la transmisión de dichos canales.

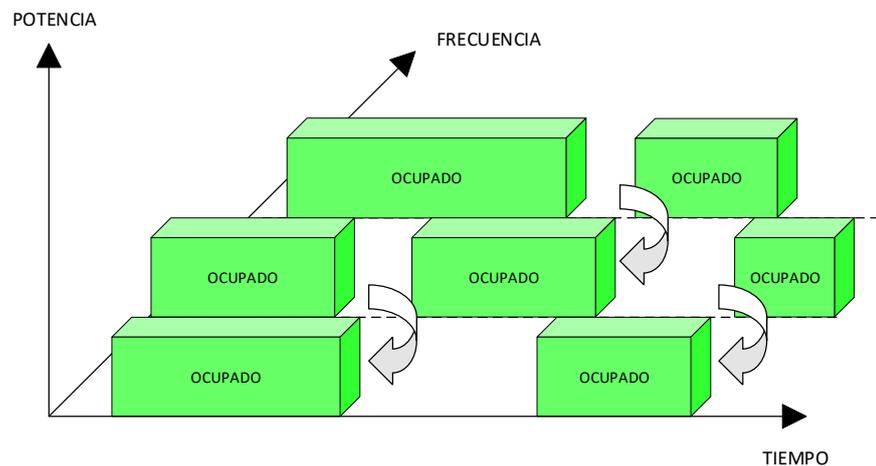


Figura 1.3 Acceso dinámico al espectro [7].

En la figura 1.3 se ilustra un ejemplo de lo que serían los canales de televisión transmitiendo bloques de datos durante determinado tiempo además de espacios de tiempo en los cuales dichos canales no son usados pudiendo demostrar que los canales no se encuentran transmitiendo todo el tiempo [7]. Este proyecto beneficiará a todos aquellos usuarios que hayan tenido inconvenientes dentro de edificios con el acceso inalámbrico por los factores antes mencionados.

Con la elaboración del algoritmo para canales conjuntos disponibles en la frecuencia asignada a televisión se logrará tener un análisis

predictivo del espectro en estudio que asista con soluciones inmediatas de descongestionamiento a la actual demanda existente en las bandas no licenciadas del espectro radioeléctrico al reutilizar los canales conjuntos desocupados.

Se pretende hacer uso de espacios en blancos denominados "White Space" en bandas con esta características de disponibilidad; sin embargo una de las bandas en donde más se debe sacar provecho es en la banda de televisión analógica debido al ya conocido apagón analógico dejando ese rango libre, dando la posibilidad de usarlo para distribuir de manera óptima el tráfico de datos en los canales no licenciados y así mejorar la calidad de señal permitiendo el aumento de usuarios y mantener el ritmo de descarga de datos a un nivel regular sin retrasos o pérdidas de paquetes. Estos "White Space" podrían ser aprovechados por dispositivos que tengan capacidad OSA, ya que constituye uno de los enfoques de DSA. Para hacer uso de este sistema se debe analizar previamente al espectro de manera estadística para detectar mediante un algoritmo predictivo los canales conjuntos libres, en el cual estos dispositivos puedan brindar sus servicios o transmitir información [7, 8, 9].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar y analizar un algoritmo de predicción de la disponibilidad para n canales conjuntos en la banda UHF-TV mediante Modelos Ocultos de Markov para contribuir con el uso óptimo de sistemas con acceso oportunista al espectro en base a datos de mediciones reales realizadas previamente en ambientes indoor.

1.3.2 Objetivo específico

- Procesar y analizar las muestras de niveles de potencia suministradas.
- Investigar una técnica de predicción adecuada al comportamiento estocástico que presenta el espectro radioeléctrico.
- Determinar los parámetros adecuados para lograr una mayor eficiencia en el algoritmo de predicción.
- Implementar el modelo matemático basado en la toma de decisiones para predecir que canales conjuntos estarán disponible en un determinado instante.

1.4 Metodología

Los métodos y procedimientos de este proyecto están basados en el diseño de un algoritmo de predicción para n canales adyacentes que se encuentren disponibles, a partir de datos de niveles de potencia medidos previamente en un edificio del centro de la ciudad de Guayaquil, estas mediciones fueron realizadas las 24 horas de cada día durante una semana. Primero se analizó la base de datos que contiene los niveles de potencia por cada canal del espectro radioeléctrico para fijar un valor de umbral, posterior a esto se creó un código de validación el cual nos da la matriz de estados a partir de los niveles de potencia que consiste en una matriz binaria, en donde "1" será para indicar que el canal está por debajo del umbral, es decir que el canal está disponible en ese momento y "0" para el caso contrario con respecto al umbral designado cuando el canal está ocupado.

El algoritmo principal procede a crear una nueva matriz para cada conjunto de canales adyacentes (cocanal) usando la matriz de estados, es aquí donde el algoritmo basado en el modelo de Markov oculto

encuentra los parámetros necesarios para realizar la predicción, determinando así la matriz de transición de estados.

Para finalizar el programa hará una comparación de los datos predichos con los originales con el fin de interpretar el comportamiento y la efectividad de predicción de los n canales conjuntos mediante gráficas, para poder determinar en qué hora del día se puede tener una mejor predicción.

El programa usado para procesar los datos e implementar el modelo estadístico de predicción será MATLAB. Este algoritmo pretende ser usado en escenarios similares al caso en estudio y podrá ser configurado en base a los parámetros que se requiera.

1.5. Estado del Arte

En este apartado se muestra la técnica estadística utilizada en esta propuesta que es el modelo oculto de markov (HMM) y de cómo este modelo ha sido utilizado en distintos problemas en donde se necesita predecir un patrón a partir de una base de datos recopilada previamente.

Los sistemas que usan HMM siguen una estadística Markoviana el cual posee un comportamiento ya definido dentro de un grupo de estados, “caracterizados por tener una evolución estocástica entre estados a lo largo del tiempo” [10].

Con las crecientes mejoras en todos los ámbitos tecnológicos, cada vez aumentan las posibilidades u opciones de cómo tratar un problema a partir de métodos estadísticos. Un buen ejemplo es la manera en cómo podemos aplicar sistemas de síntesis de voz con altas exigencias para que el sistema funcione con la mejor calidad a tal punto que no se note la diferencia entre una voz humana y una sintética partiendo de la lectura de un texto. Esta calidad se logra mediante un sistema que

realiza una división del texto en tramas que son tomadas como muestras para generar los parámetros necesarios basados en entonación y duración de fonemas con la finalidad de anticiparse a futuras palabras aprovechando la información contextual. De esta manera se usa la menor cantidad de recursos posibles, es así como nace la idea de aplicar el HMM, tal modelo obtuvo resultados positivos en cuanto a calidad de voz y uso de memoria del equipo, en la aplicación mencionado [10].

En el ámbito científico, HMM se usa para modelar y clasificar conjuntos de proteínas en la búsqueda de genes y su alineamiento variado de secuencia. En este trabajo lo primero fue “identificar las diferentes regiones de la secuencia y estimar su función en comparación con lo encontrado en otras especies” [11], durante el tiempo que ha transcurrido desde que apareció por primera vez este modelo ha ido incrementado su complejidad; existe un programa utilizado para la búsqueda automática de genes llamado GENESCAN.

Otro aporte que se ha logrado gracias al modelo HMM es el reconocimiento de señales sismo-volcánicas (VSR por sus siglas en inglés), ya que la base de datos de ciertos Volcanes es variable y de larga duración la mayor parte del tiempo. De esta manera HMM se convierte en una de los métodos más usados en VSR. “Dichos modelos permiten posteriormente una clasificación sobre registros continuos de forma automática y no supervisada” [12].

Las telecomunicaciones son cada vez más imprescindibles en todos los ámbitos a nivel mundial, tanto como en el flujo de información, crecimiento económico, producción e innovación. Los dispositivos son cada vez más prácticos, más eficientes con mejores prestaciones y con más requisitos, desplazando a tecnologías que van quedando rezagadas. Entonces el panorama dentro del mercado actual crece

rápidamente, así mismo el acceso a la banda ancha se convirtió en una prioridad gracias a la gran demanda. Es por esto que se desea una administración óptima en el espectro radioeléctrico, para lo cual se debe trabajar con asignaciones dinámicas a los canales. Las tecnologías que nos permiten hacer este tipo de gestiones son sistemas de radio cognitiva (CR) teniendo como objetivo el acceso oportunista al espectro (OSA). Esto permite a los usuarios secundarios, es decir los que no poseen bandas concesionadas poder acceder a estas sin causar interferencias. Existen ya investigaciones relacionadas con esta propuesta.

Desde hace unos 10 años atrás aproximadamente se comenzó a realizar estudios para utilizar de mejor manera el espectro radioeléctrico. Se han dado dos alternativas que son sistemas radioeléctricos definidos por soportes lógico y los cognoscitivos, en esta propuesta se tratará la alternativa cognoscitiva [13]. Investigaciones anteriores acerca del acceso oportunista al espectro se han basado en varias técnicas o métodos estadísticos para poder procesar los datos e información según el tipo de parámetros o evento, y así poder usar los llamados "White Space" en las bandas concesionadas [8].

1.6 Alcance

El presente proyecto dará un incentivo a futuros estudios para la creación de nuevas tecnologías en ambientes de comunicación inalámbricas como Wi-Fi. Al predecir en qué momento un canal estará libre, por cuánto tiempo y usarlo de manera óptima sin interferir en su transmisión de información con el fin de descongestionar un canal adyacente, tiene muchas aplicaciones en el ámbito tecnológico.

La detección de un canal libre en un instante de tiempo consta en enviar una base de datos realizados en un lugar y tiempo determinado a una estación base en donde podremos analizar dichos datos para procesarlos mediante un algoritmo predictivo ya diseñado bajo parámetros y circunstancias similar al evento a tratar, esto nos ayudará a determinar con certeza si dicho canal está libre o disponible, si no se encuentra libre, el algoritmo buscará en la base de datos otros canales para ver si se encuentran disponibles o no y así conectar al dispositivo con capacidad OSA con dicho canal [9].

Para nuestro proyecto el banco de mediciones de niveles de potencia en dBm de los cuales hemos sido provistos es un requisito determinante para lograr una predicción fiable. Las relaciones entre variables o parámetros se harán para cada canal en el piso de la edificación y para cada hora del día. Se debe tener en cuenta que este proyecto está proyectado hacia ambientes indoor, para un edificio ubicado en una zona urbana. Por lo tanto el escenario donde este proyecto tendrá mejor validez es el antes mencionado.

Para tener un mejor enfoque en el proyecto es necesario conocer sobre las tecnologías a tratar y en qué bandas operan, así como también las normativas que rigen en el país.

1.7 Limitaciones

Este proyecto está enfocado a ser usado en circunstancias con características similares al escenario en estudio para así garantizar su correcto desempeño en el establecimiento a ser analizado, de lo contrario no se podría asegurar el correcto funcionamiento del algoritmo ya que los datos recopilados podrían ser tabulados de forma diferente y

se presente distintas dimensiones en las matrices de estado, dando como resultado un error en el algoritmo o una predicción errónea.

Otra limitante que no está considerada en este proyecto es la elección del mejor cocanal disponible, es decir que al momento de predecir y exista más de un cocanal inclusivo disponible (esto quiere decir que uno o más canales pueden ser usados en más de una combinación), se deba elegir el más factible que dé la mayor cantidad de beneficios en cuanto a la utilidad que se le pueda dar, esta circunstancia sería usar aquel en donde se pueda transmitir por un periodo más largo, optimizando la utilidad de recursos que usaría un sistema al buscar menor cantidad de combinaciones para realizar los cambios de canales conjuntos durante la transmisión.

CAPÍTULO 2

2 Marco Teórico

2.1 Espectro Radioeléctrico

Es un recurso natural, intangible y de carácter limitado por medio del cual las ondas electromagnéticas se propagan, se lo utiliza principalmente para la transmisión de información ya sea voz o datos.

Este espectro conforma una parte del espectro electromagnético (espectro conformado por todas las ondas electromagnéticas que varían en longitud de onda y por lo tanto en su frecuencia). Está dividido por bandas o rangos de frecuencia para tener un mejor estudio del espectro y para prestar de manera más ordenada servicios de telecomunicaciones a diferentes entidades o empresas de telecomunicaciones que están avaladas y protegidas por instituciones públicas.

De esta manera se tiene que el espectro radioeléctrico es de vital importancia de la organización y ocupación empresarial e industrial en el campo de las telecomunicaciones, televisión, radiodifusión, comunicación en navegación o transporte, servicios públicos y privados. Teniendo mayor peso en el ámbito económico, brindando desarrollo de mercado con nuevas tecnologías y comercialización de servicios [14].

Características Básicas del Espectro Radioeléctrico

El Espectro radioeléctrico está establecido desde 3 KHz a 3000 GHz, en donde se generan las ondas, que son transmitidas y recibidas por medio de antenas [14].

BANDAS DE FRECUENCIAS				
<i>Número de la banda</i>	<i>Símbolos (en inglés)</i>	<i>Gama de frecuencias</i>	<i>Subdivisión métrica correspondiente</i>	<i>Abreviaturas métricas para las bandas</i>
4	VLf	3 a 30 KHz	Ondas miriamétricas	B.Mam
5	LF	30 a 300 KHz	Ondas kilométricas	B.km
6	MF	300 a 3000 KHz	Ondas hectométricas	B.hm
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas	B.dam
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas	B.m
9	UHF	300 a 3000 MHz	Ondas centimétricas	B.dm
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas milimétricas	B.cm
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas decimimétricas	B.mm
12		300 a 300 GHz		

Tabla 2.1 Bandas de frecuencias [14].

2.1.1 Conceptos Técnicos

Frecuencia

Es un valor entero que denota el número de veces que se repite un fenómeno o evento por unidad de tiempo. En telecomunicaciones, frecuencia es el número de ondas u oscilaciones completas que pasan por un punto en un periodo de tiempo. Se define frecuencia como la velocidad de la luz entre la longitud de onda. Se expresa en Hertz (ciclos por segundo) [15].

Potencia

La potencia en una señal está definida como la cantidad de energía o trabajo que se puede realizar por unidad de tiempo. Se expresa en Watt o Vatio. En telecomunicaciones es común tener la potencia en unidades de decibel (dB) que es una medida logarítmica.

Propagación

En el ámbito de las telecomunicaciones se puede decir que propagación son fenómenos físicos que transportan o llevan a las

ondas radioeléctricas de un punto a otro, en este caso de un transmisor a un receptor. Una propiedad elemental que posee el espectro radioeléctrico es la cualidad de propagarse por el espacio sin necesidad de algún mecanismo o intervención externa. El alcance de las ondas propagadas va a depender necesariamente de la frecuencia y la potencia que maneje el equipo de comunicación.

Interferencia

Se conoce como interferencia a todo lo que destruye, distorsiona o altera a la señal original mientras se propaga en el espectro radioeléctrico por un canal entre transmisor y receptor. Las interferencias a tratar en este estudio serán, interferencia co-canal e interferencia intersimbólica [16].

2.2 Gestión del Espectro Radioeléctrico

El espectro es gestionado mediante un conjunto de métodos para la administración eficiente del espectro radioeléctrico a través de los servicios de radiocomunicaciones definidos por UIT quien se encarga de las reglas, normas y desarrollo de las telecomunicaciones a nivel mundial [14,17].

Esta gestión está organizada en 3 grupos de trabajo los cuales estudian la asignación del espectro:

- (GT 1A) - “Técnicas de ingeniería del espectro” [17].
- (GT 1B) - “Metodologías para la gestión del espectro y estrategias” [17].
- (GT 1C) - “Comprobación técnica del espectro” [17].

2.2.1 Regulación del Espectro

Como se ha mencionado en apartados anteriores el espectro radioeléctrico hoy en día es un recurso primordial para brindar servicios de comunicación y operación de redes. Así mismo las órbitas del espacio en la cuales están los satélites y el espectro radioeléctrico son recursos naturales y comunes, por lo tanto el acceso a los mismos es compartido por lo que esto ha venido presentando un problema ya que el acceso libre y no reglamentado o regulado a un recurso, el cual se considera limitado, ocasiona inconvenientes entre usuarios de un servicio en específico. Es por esto que el espectro es un objeto de regulación para poder mantener un orden en la emisión de ondas radioeléctricas, lo cual desemboca en el área de telecomunicaciones.

Desde un principio, el espectro radioeléctrico se ha tratada como un recurso escaso, por lo que un servicio en específico tiene asignado solo una banda de frecuencia, tomando en cuenta que esa banda está designada también para un lugar geográfico en específico para poder evitar interferencias que perjudiquen el servicio.

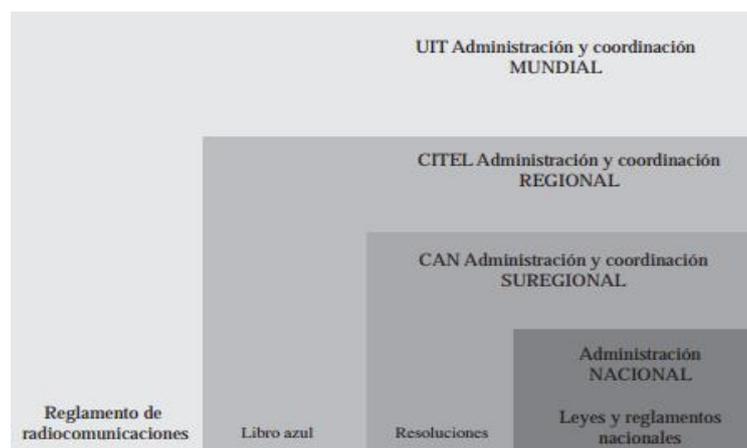


Figura 2.1 Regulación Jerárquica del Espectro Radioeléctrico [14].

El libro azul, políticas de telecomunicaciones para las Américas. “Es una herramienta para proporcionar a los países de la región de las

Américas Descripciones e información objetivas sobre políticas y asuntos relativos a la regulación incluidas las dificultades y oportunidades que presenta el desarrollo de nuevas tecnologías de telecomunicaciones” [18].

2.3 Acceso Oportunista al espectro

También conocido como OSA consiste en un grupo de reglamentos, métodos y dispositivos de monitoreo, las cuales detectan espacios libres en el espectro para poder hacer uso de ellos sin causar interferencia, con el fin de reducir los inconvenientes en el espectro radioeléctrico ocasionados por la escasez y el uso poco eficiente del mismo, OSA constituye una de las visiones en relación al concepto de Acceso Dinámico al Espectro (DSA) sigue un plan de jerarquía a los usuarios no licenciados se les permite el acceso y aprovecharse de los espacios espectrales sin usar por los usuarios licenciados durante un periodo de tiempo o en alguna área geográfica [19].

OSA está estructurada en tres partes, un módulo para identificación de espectro, módulo de explotación y además el de políticas de regulación para el uso del mismo. El de identificación permite hacer seguimiento a las bandas dinámicas que poseen disponibilidad en tiempo y espacio, el siguiente permite analizar los datos del módulo anterior para decidir su transmisión y el último nos permite garantizar que los sistemas serán compatibles mediante la definición de la etiqueta básica [7, 20, 21]. Como principal objetivo OSA es beneficiar a usuarios secundarios al reutilizar el espectro protegiendo a los usuarios licenciados con las políticas regulatorias que eviten interferencias entre ambos.

2.3.1 Arquitectura de una red OSA

Una red OSA están conformadas por: Redes primaria y Redes secundarias.

Red Primaria

En esta sección se encuentran las redes licenciadas tienen la aprobación permitiéndoles operar en la banda asignada por el ente regulador de las telecomunicaciones en la localidad donde se encuentra ubicada la red. En la red primaria las transmisiones de datos no las puede interferir señales que no posean licencia para acceder a esa banda de frecuencia.

Red Secundaria

Aquí se encuentran los usuarios no licenciados; por lo tanto para esta parte de la red interviene el acceso oportunista al espectro es también llamada OSAN. Una red OSAN está compuesta por los siguientes componentes: Usuarios OSA como no tienen acceso a una red licenciada necesitan de otras funciones para poder compartir la banda con los usuarios licenciados.

Estación Base OSA mediante esto los usuarios pueden conectarse entre sí y con otras redes OSA por último se encuentra el Agente del espectro es el encargado de otorgar las funciones para distribuir el espectro entre redes OSAN.

2.3.2 Radio Cognitiva

Es una manera de comunicarse inalámbricamente posee un transceptor inteligente capaz de detectar los canales de comunicación que no son usados y los que están siendo usados, a su vez usar los canales que se encuentran disponibles evitando el uso de aquellos

que se encuentran ocupados en el mismo momento al hacer uso de este tipo de tecnología se mejora el uso del espectro y se logra evitar en cierta medida la interferencia con otros usuarios.

En esta comunicación inalámbrica las redes y los nodos inalámbricos capaces de cambiar los criterios para transmitir o recibir para ejecutar la búsqueda de canales disponibles realizando la comunicación sin interferir con los usuarios que poseen licencia en dichas bandas, este cambio de criterio se basa en los siguientes factores: Espectro de Radiofrecuencia, comportamiento del usuario y estado en el que se encuentra la red. Hay varios tipos de radio cognitiva que necesitan de diferentes criterios para tomar decisiones para cambios al transmitir y recibir información.

Radio Cognitiva Completa es también conocida con el nombre de Radio de Mitola se consideran los diferentes criterios al decidir los cambios para transmisión y recepción.

Radio Cognitiva Detectora del Espectro es un caso único en el cual solo es observado el espectro de radiofrecuencia.

Radio Cognitiva de banda bajo licencia está preparada para usar bandas de usuarios licenciados a su vez puede utilizar bandas libres tales como las bandas UNII o ISM, un sistema parecido a este es el estándar IEEE 802.22.

Radio Cognitiva de banda de libre acceso esta solo puede hacer uso de las bandas de libre acceso al espectro un ejemplo es el estándar IEEE 802.19 [22].

Funciones principales de la Radio Cognitiva posee dos funciones principales las cuales son detección del espectro y gestión del espectro.

Detección del espectro: Para que la radio cognitiva funcione de manera correcta una de sus necesidades principales es la detección del espectro que ha sido aprovechado de manera ineficaz para usarlo sin provocar interferencia entre usuarios. La mejor forma para encontrar disponibilidad es detectando a los usuarios licenciados, existen tres categorías en las que se puede dividir las técnicas de detección [22].

Detección de transmisiones: La tecnología de radio cognitiva debe estar preparada para poder detectar la existencia de una señal de algún usuario en una parte determinada del espectro.

Detección Corporativa: Los usuarios de la radio cognitiva tienen la posibilidad de cambiar entre ellos las diferentes detecciones que hayan obtenido de los usuarios licenciados.

Detección basada en interferencia: Debe ser capaz de poder detectar las partes del espectro de radiofrecuencia en donde exista interferencia.

Gestión del espectro: Usar el ancho de banda que se adecue de mejor manera a las necesidades de calidad de servicio que requiera el usuario entre todas las frecuencias disponibles, posee dos pasos.

Análisis del espectro: Descubre cada característica que posea las diferentes bandas para saber las ventajas o desventajas al usarla.

Decisión del espectro: Realiza la comparación de las características de cada banda con las que el usuario necesita para elegir la más conveniente.

Movilidad del espectro: En esta función la radio cognitiva es capaz de cambiar la frecuencia en que transmite o recibe el usuario sin que este pueda percibir que ocurra el cambio.

Compartición del espectro: Consiste en buscar un sistema para esquematizar la repartición del espectro de tal manera “que sea equitativo y justo para los usuarios” sin interferir a los que poseen licencia [22].

2.4 TVWS

TV White Space (TVWS), es un término usado para referirse al rango de espectro licenciado que no son usados todo el tiempo o en ciertos lugares geográficos se encuentran disponibles o libres por el proceso de digitalización de señales de televisión analógicas en algunos países, para lograr este fin existen ciertas normas creadas por la IEEE (IEEE 802.11af, IEEE 802.22) [8]. Al reusar el ancho de banda de los espacios en blanco se gana un mayor alcance en cuanto a la cobertura que poseen estas frecuencias.

Entre las aplicaciones para los espacios en blanco tenemos las siguientes:

- Descongestionamiento de la banda de WI-FI de 2.4 GHz aumento del alcance y penetración de dicha señal.
- Backhaul inalámbrico el desarrollo de TVWS podría contribuir a la eliminación de cableado haciendo enlaces de punto a punto.
- M2M se trata de transmisores de poca potencia para realizar monitoreo de máquinas inteligentes, usar los TVWS en la comunicación de M2M es una alternativa eficaz debido a que gran parte de estos equipos son compatibles con protocolos OSA [8].

2.4.1 Estandarización

IEEE 802.22 Estándar para redes WRAN aplicado en sectores pequeños con poca cantidad de habitantes se transmiten los datos inalámbricamente un ejemplo común es un sector rural con radio de 10 a 30 Km de cobertura.

IEEE 802.11af Estándar para adaptar el funcionamiento WI-FI sobre TVWS modificando la capa física de IEEE 802.11 para que los sistemas de comunicación wi-fi tengan acceso a los espacios en blanco con las regulaciones necesarias.

IEEE 802.19.1 Utilizado en el desarrollo de mecanismos para que los estándares que trabajan en los espacios en blancos puedan coexistir.

2.5 Televisión analógica

La televisión hasta principios del siglo XXI fue analógica estas señales llegaban a los televidentes mediante el aire por ondas de radio en las bandas VHF y UHF (30 MHz – 300 MHz), luego fueron evolucionando el modo en que llegaba su señal a casa de los televidentes pasando a redes de cable los cuales distribuían los canales por ciudad.

La tecnología de televisión analógica permitía transmitir un programa en un ancho de banda de 6 MHz además los canales adyacentes deberían estar libres de transmisión para evitar interferencias entre canales [23]. Televisión analógica posee los siguientes formatos algunos de ellos varían según la región geográfica en la que se encuentre el televidente:

- PAL
- NTSC

Para televisión digital las imágenes y sonidos son transmitidos mediante señales digitales a diferencia de la televisión análoga, se codifica su

señal de manera binaria, existen 4 estándares para la transmisión de televisión digital [23]:

- ATSC
- DVB-T
- ISDB-T
- DTMB

En el país se usa el estándar NTSC para tv analógica e ISDB-T para tv digital.

2.6 Cadenas de Markov

Los procesos de Markov tienen una gran importancia en los análisis o procesos estocásticos. En este apartado se hablará sobre las cadenas de Markov en el ámbito de probabilidades. Las cadenas de Markov tienen como principal característica que las variables aleatorias dependen únicamente del estado anterior inmediato del sistema. Pasar de un estado a otro en el transcurso del tiempo hace que se produzca una Transición [28].

Se puede decir entonces que las cadenas de Markov no son más que unos eventos que ocurren de manera seguida y que cambian en el transcurso del tiempo, teniendo en cuenta que “la probabilidad de que ocurra un evento depende únicamente del evento anterior inmediato” [28].

2.6.1 Conceptos básicos

Proceso Estocástico

Es una secuencia de variables aleatorias (estocásticas) que se generan en función de otras variables aleatorias del proceso, tiene su propia PDF y entre ellas, pueden estar correlacionadas o no [24].

Variables aleatorias

Llamada también variable de azar o variable estocástica, significa cantidad que está sujeta a tomar varios valores de improviso [25].

Estado

Un estado es una circunstancia en la que se halla algo o alguien para estos casos se refiere al modo de ser o de estar [26].

Evento

Es un suceso de algo que puede ocurrir, un evento puede producirse de manera inesperada o algo planeado [27].

Probabilidades de transición

Es un conjunto de estados finitos n ($E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$) las cuales poseen una probabilidad condicional denotada de la siguiente manera:

$$p_{ij} = P(X_{n+1} = s_j | X_n = s_i) \quad (2,1)$$

Para que un estado E_i se pueda comunicar con un estado E_j la probabilidad $p_{ij} > 0$ a esto se le conoce como probabilidades de transición para las cuales se debe cumplir $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$. Los valores p_{ij} se unen formando una matriz de transición de tamaño $n \times n$ [28].

$$T = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

2.7 Modelo Oculto de Markov

Llamado HMM por sus siglas en inglés continúa un proceso de Markov con parámetros desconocidos, este proceso a diferencia de un modelo común de Markov tiene estados que no son completamente visibles

para el observador. Cada estado posee su propia distribución de probabilidad relacionada a sus posibles resultados de salida dando información de su secuencia de estados.

2.7.1 Arquitectura de un modelo oculto de Markov

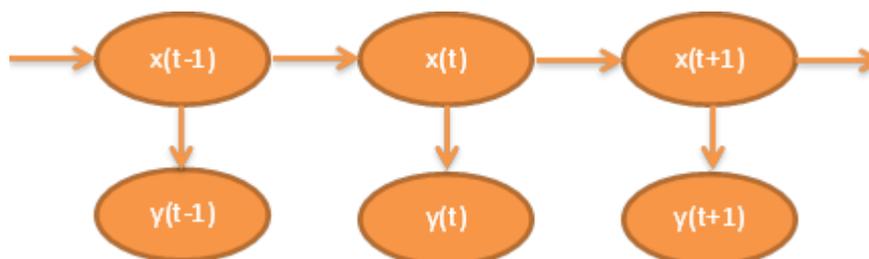


Figura 2.2 Arquitectura modelo Oculto de Markov [22].

HMM puede ser definido como un proceso estocástico doble que cumple las siguientes características [29]:

- Primero se tiene un proceso estocástico que posee un número de estados finitos, en el que cada estado estará asociado a una distribución de probabilidad, para cambiar de un estado a otro se necesitara de una matriz de transición [29].
- El segundo proceso estocástico tiene posibles resultados observados a lo largo del tiempo. La PDF de este conjunto de resultados es generada por cada estado del primer proceso estocástico [29].

Este modelo es utilizado en la predicción de estado o evento siguiente a través de estados anteriores, para nuestro caso predecimos la disponibilidad de canales conjunto en base al estado anterior inmediato a dicho cocanal. Para lograr esta predicción HMM consta de 3 parámetros necesarios: Matriz de transición, Matriz de emisión y el vector de probabilidad inicial, denotados de la siguiente manera respectivamente $\lambda = (A, B, \pi)$.

Para describir las ecuaciones necesarias para encontrar las matrices denominaremos un conjunto de n-estados Q_n en el cual su subíndice n será la posición en la que se encuentra ubicado tal estado; procedemos a mostrar las ecuaciones para sacar matriz de transición y de emisión para el modelo oculto de Markov.

Matriz de transición (A): Es un conjunto de probabilidades p_{ij} tal que:

$$A = p_{ij} = P(Q_n = j | Q_{n-1} = i) \quad (2,2)$$

Probabilidad de encontrarse en el estado j en la posición n dado que en la posición anterior (n-1) se encuentra en el estado i. Es necesario que $p_{ij} \geq 0$ además la sumatoria de las probabilidades p_{ij} debe dar un valor de 1 en cada fila de la matriz de transición.

Matriz de emisión (B): Es un conjunto de probabilidades $b_j(V_k)$

$$B = b_j(V_k) = P(O_n = V_k | Q_n = j) \quad (2,3)$$

Probabilidad de observar V_k en el que el término k se refiere al k-ésimo dato observado estando en el estado j en la posición n, pero para que esté probabilidad se cumpla primero se debe satisfacer lo siguiente [29]:

$$b_j(V_k) \geq 0, \quad 1 \leq j \leq n, \quad 1 \leq k \leq m \quad (2,4)$$

$$\sum_{k=1}^m b_j(V_k) = 1, \quad 1 \leq j \leq n \quad (2,5)$$

El valor de m dependerá de la cantidad de datos observados, se debe tener en cuenta que se usa función de densidad de probabilidad o distribución de probabilidad dependiendo del tipo de muestra que se esté analizando.

Vector de probabilidad inicial (π): Determina la probabilidad del siguiente estado:

$$\pi(i) = P(Q_k = S_i) \quad (2,6)$$

CAPÍTULO 3

3. Diseño del proyecto

3.1 Descripción

En este capítulo se procederá a explicar desde el análisis que se hizo con los datos de potencias hasta la forma, metodología, pasos y procesos que fueron necesarios para el desarrollo del algoritmo. El estudio de estos comenzó a partir de la asignación de un rango de frecuencia de 6 [MHz] que es el ancho de banda para cada canal de televisión analógica ya que en los datos proporcionados solo puede observarse las frecuencias en que se midieron con los minutos en los que se hicieron a su vez se observa que para cada minuto en el intervalo existían varios valores de potencia; y como son valores analógicos para cada rango el valor de mayor potencia es el elegido para hacer los siguientes análisis. Una vez realizado ese análisis obtuvimos los canales desde el 19 hasta el 49 por el rango de frecuencias que poseían los datos. A partir de este análisis procedemos con el tratamiento para llegar a la predicción requerida.

Lo primero será encontrar la disponibilidad de los canales una vez hecho esto se procede a encontrar los canales conjuntos para luego comenzar a encontrar la matriz de transición con la matriz de emisión y continuar hasta poder llegar al algoritmo de predicción que se desea.

3.2 Disponibilidad de canales

Como primer paso se necesitó analizar los valores de potencia en los datos para establecer una matriz de disponibilidad en los canales a trabajar para ello haremos un pequeño algoritmo basándonos en los siguientes parámetros.

$$\emptyset = \begin{cases} 1; & X_{i,j} < \theta \\ 0; & \text{para otros} \end{cases}$$

Donde $X_{i,j}$ será cada valor de potencia en cada posición de la matriz de potencia del día que se está analizando esto lo vamos a comparar con un valor de umbral que nosotros asignaremos para que nos ofrezca una mejor variabilidad en cuanto a la disponibilidad haremos un barrido desde -85dbm hasta -60dbm y observaremos cual será el mejor umbral para estos datos en los que trabajaremos.

Asignaremos el valor de 1 o 0 de la siguiente manera 1 cuando el canal se encuentre disponible en base al umbral θ y 0 será cuando se encuentre ocupado.

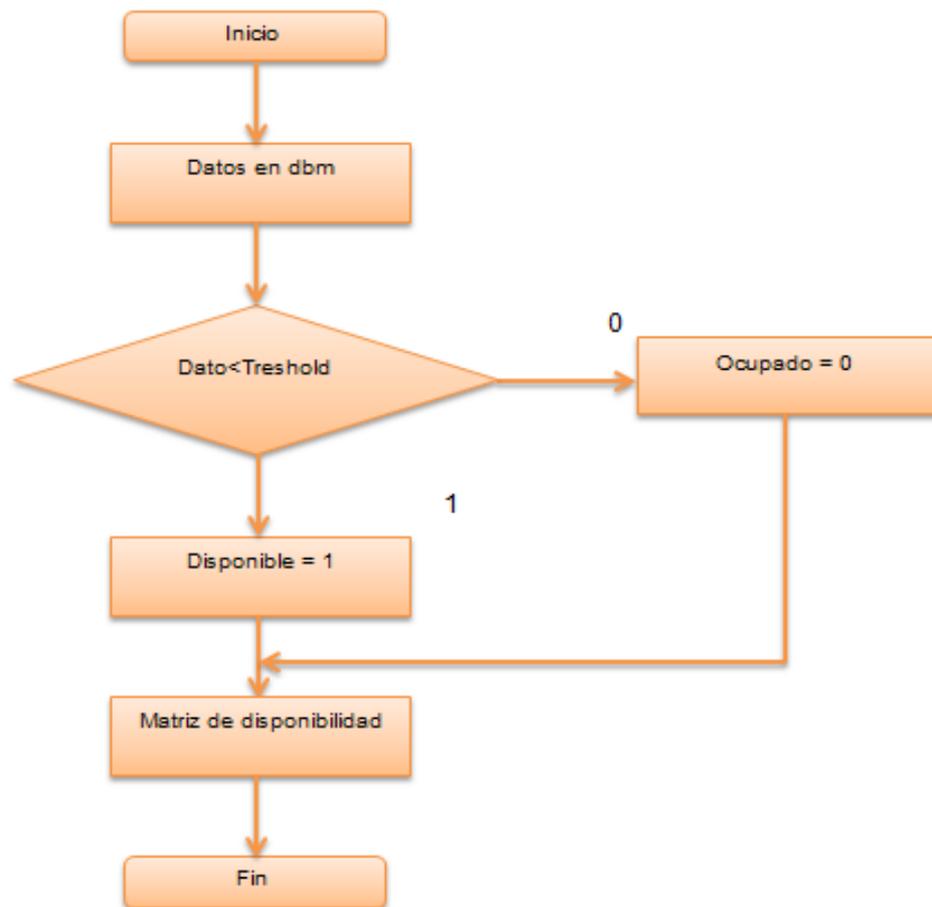


Figura 3.1 Diagrama de flujo para disponibilidad de canales.

3.3 Canales conjuntos

Después de haber obtenido la matriz de estados para cada día de la semana pasamos a encontrar los canales conjuntos que pueda poseer dicha matriz. Cada matriz posee 31 canales por lo tanto existe la posibilidad de obtener hasta 31 canales conjuntos disponibles para lo cual se realizó un pequeño programa que permite obtener una matriz de todos los n canales conjuntos posibles en estos datos. La matriz de canales conjuntos la haremos con la siguiente referencia para evaluar si lo son o no:

$$\delta = \begin{cases} 1; & X_{i,j} = (X)_{\sum_1^{n-1}(i+n),j} \\ 0; & \text{para otros} \end{cases}$$

Comparamos el valor en la posición $X_{i,j}$ con el siguiente $X_{i+1,j}$ y si son iguales se le asigna 1 diciendo que son canales conjuntos, 0 si es que no lo son. Una vez realizada la comparación se aumentan las posiciones de acuerdo a la cantidad de canales conjuntos que se quiera comprobar.

Tiempo\Canal	Canal 31	Canal 32	Canal 33	Canal 34	Canal 35	Canal 36
t1	1	1	0	0	0	1
t2	1	1	0	1	0	1
t3	1	1	0	1	0	1
t4	1	1	0	1	0	1
t5	1	1	1	1	0	1
t6	1	1	1	1	0	1
t7	1	1	1	1	0	1
t8	1	1	0	1	0	1

Tabla 3.1 Canales conjuntos forma en que se agrupan.

Tiempo\Canales Conjuntos	2 CC	3 CC	4 CC
t1	1	0	0
t2	1	0	0
t3	1	0	0
t4	1	0	0
t5	3	2	0
t6	3	2	1
t7	3	2	1
t8	1	0	0

Tabla 3.2 Cantidad de combinaciones de canales conjuntos.

3.4 Modelamiento del algoritmo predictivo

Dada las características y el modelado estocásticos de los datos de los cuales hemos sido provistos, se puede generar un algoritmo predictivo a partir de modelos Markovianos.

En la figura 2.5 del capítulo anterior podemos notar que la variable aleatoria de carácter oculto “X” depende únicamente de su valor anterior inmediato (t-1), mientras que la variable aleatoria observable “Y” depende del valor que esté tomando “X” en ese instante de tiempo. El modelado de este algoritmo consiste en obtener la mejor generación de la mejor secuencia de los datos observados siguiendo paso a paso el modelo oculto de Markov. Los parámetros necesitados para obtener dicha secuencia son $\lambda = (\pi, A, B)$ donde:

π = Es el vector de probabilidad inicial de cada estado.

A = Es la matriz de Transición.

B = Es la matriz de Emisión.

3.4.1 Vector inicial (π)

Este vector de dimensión (n x 1) donde n es el número de estados que están involucrados en el proyecto. Cada fila tiene la probabilidad de que se dé un estado. En este caso sólo hay dos posibles estados, por

lo que se puede describir al vector inicial como $S=[S_1, S_2]$, donde S_1 hace referencia a la probabilidad de ocurrencia del primer estado y S_2 hace referencia a la probabilidad de ocurrencia del siguiente y último estado para este caso de dos estados. Se usa las siguientes ecuaciones para encontrar sus probabilidades en la muestra de tamaño m , partiendo de la ecuación (2,6):

$$\pi_0 = P(X_k = S_0) \quad (3,1)$$

$$\pi_1 = P(X_k = S_1) \quad (3,2)$$

3.4.2 Matriz de transición (A)

Esta matriz de transición depende del número de estados del modelo, en este caso tenemos 2 estado para la variable “Disponibilidad”, donde 1 representa al estado disponible y cero representa al estado ocupado. Dicho esto se crea la matriz de 2x2 para nuestro modelamiento predictivo.

Previo al análisis de cambios o transiciones de estados se trabajó la muestra de valores observados de tal manera que se pueda contabilizar el número de transiciones que existe dentro de la misma como lo explica la Figura 2.5. La matriz de transición estará conformada de la siguiente manera:

$$T = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}$$

Los componentes de dicha matriz fueron determinadas usando la ecuación (2,2) primero se encuentra el valor de la primera componente, es decir fila 1 columna 1, este valor determina la probabilidad de que estando en el estado 0, este se mantenga en el mismo estado de valor 0 sin hacer ningún cambio al siguiente estado en ningún momento.

$$P_{00} = \frac{P(0\Omega 0)}{P(0)} \quad (3,3)$$

La siguiente componente de la misma fila, será la probabilidad de que estando en el estado 0 se produzca un cambio al estado siguiente, es decir al estado 1. Esta probabilidad es también el complemento de la componente anterior ya que la sumatoria de los valores de esta fila debe dar igual a 1. En la ecuación 3,3 se encuentra como hallar el valor de dicha probabilidad para nuestra muestra teniendo en cuenta el número de transiciones que existen.

$$P_{01} = 1 - P_{00} \quad (3,4)$$

Una vez completada la fila anterior se procede con la fila siguiente que es la del estado 1 de la misma manera que se halló la primera fila, se halla el valor de la columna 2 para la segunda fila que denota la probabilidad de que están en el estado 1, el siguiente estado siga siendo el mismo estado 1, es decir que no exista una transición de estados.

$$P_{11} = \frac{P(1\Omega 1)}{P(1)} \quad (3,5)$$

Para finalizar se halla el valor de la columna uno en donde se calcula la probabilidad de que estando en el estado 1 exista un cambio al estado 0.

$$P_{10} = 1 - P_{11} \quad (3,6)$$

3.4.3 Matriz de emisión

Esta matriz está compuesta por valores con características que no son observables o cuantificados a simple vista pero que a su vez se necesita de los datos observables como los valores de potencia de la señal, para poder determinarlos. Para obtener los valores de la matriz de emisión se trabajara con la matriz de canales conjuntos que se

mencionó al inicio de este capítulo. Estos valores también son probabilidades en donde también la suma de cada componente para cada fila debe dar igual a uno.

Estos valores denotan la probabilidad de que estando en un determinado estado, ocurra el caso de encontrar sólo una combinación de cocanales de interés para una componente en ese estado, hasta la posibilidad de encontrar el mayor número de combinaciones de cocanales de interés en nuestra matriz de canales conjuntos.

La dimensión de dicha matriz varía en el número de columnas ya que dependerá del número de canales conjuntos que sean de interés. Mientras que el número de filas seguirá siendo igual 2 ya que harán referencia a los estados con lo que se esté trabajando. Dicho esto se puede decir que la matriz de Emisión tendrá un valor de $2 \times (j+1)$, en donde el valor de j está dado por la ecuación 2,3. Se añade una columna más a la matriz ya que se debe considerar que para un estado puede que no exista la posibilidad de encontrar combinaciones de cocanales disponibles.

$$j = (31 - (n - 1) + 1) \quad (3,7)$$

3.5 Análisis del tamaño de la muestra de datos observables

Para obtener la matriz con mejores resultados analizaremos el porcentaje de efectividad que nos arroje cada uno a continuación presentaremos una tabla para mostrar el rango elegido y su motivo.

Tamaño de la muestra en horas	Porcentaje de efectividad para 2cc	Porcentaje de efectividad para 3cc	Porcentaje de efectividad para 4cc
12 horas	68,33% - 52,08%	64,03% - 61,87%	93,97% - 91,19%
6 horas	66,57% - 62,13%	76,66% - 72,30%	93,33% - 90,05%
3 horas	72,23% - 65,87%	84,20% - 80,10%	95,23% - 92,30%

Tabla 3.3 Análisis de efectividad matriz de transmisión por rango día martes.

Como se muestra en la tabla 4 se puede observar como para los distintos tamaños de la muestra se observa los rangos de eficacia para canales conjuntos tomando de referencia hasta cinco canales conjuntos, se muestra un rango de eficacia porque se realizó varias predicciones tomando nota de los resultados, llegando a la conclusión que el rango adecuado para nuestro algoritmo de predicción será de 3 horas (un tamaño igual a 180 datos) y nos da para el peor de los casos una efectividad de 65,87% para una combinación específica de dos canales conjuntos; luego comparando las predicciones para 3, 4 y 5 canales conjuntos se confirma que es el rango adecuado más adelante mostraremos otros análisis para determinar si algún tipo de combinación de canales conjuntos será descartada y las razones por las cuales se haría eso.

3.6 Algoritmo de predicción

El algoritmo de predicción será realizado en Matlab con la ayuda de diversas funciones que posee el mismo tales como importar, exportar datos desde Excel y muchas más en beneficio de nuestro objetivo. Este algoritmo se basa en el modelo de Markov oculto y para esto Matlab posee funciones que nos ayudaran al momento de predecir facilitando la implementación de las ecuaciones necesarias para realizar una predicción con este método.

Una vez encontrados de forma correcta los parámetros necesarios para esta predicción los cuales ya fueron mencionados previamente en el desarrollo de este capítulo se pasará a utilizar la función `hmmgenerate` la cual describiremos a continuación para un mejor entendimiento de su funcionamiento.

La función está descrita de esta manera: `[seq, states] = hmmgenerate(len, trans, emis)`; en donde los parámetros de entrada son la longitud de las secuencias a generar, la matriz de transmisión y la matriz de emisión respectivamente, mediante los cuales se creará una secuencia de símbolos de emisión y una secuencia de estados.

Los parámetros que ingresarán no siempre tendrán los mismos valores; la matriz de transición se actualizara cada 3 horas durante el día predicho mientras que la matriz de emisión será la misma para cada conjunto de cocanales posibles en todos los intervalos de tiempo.

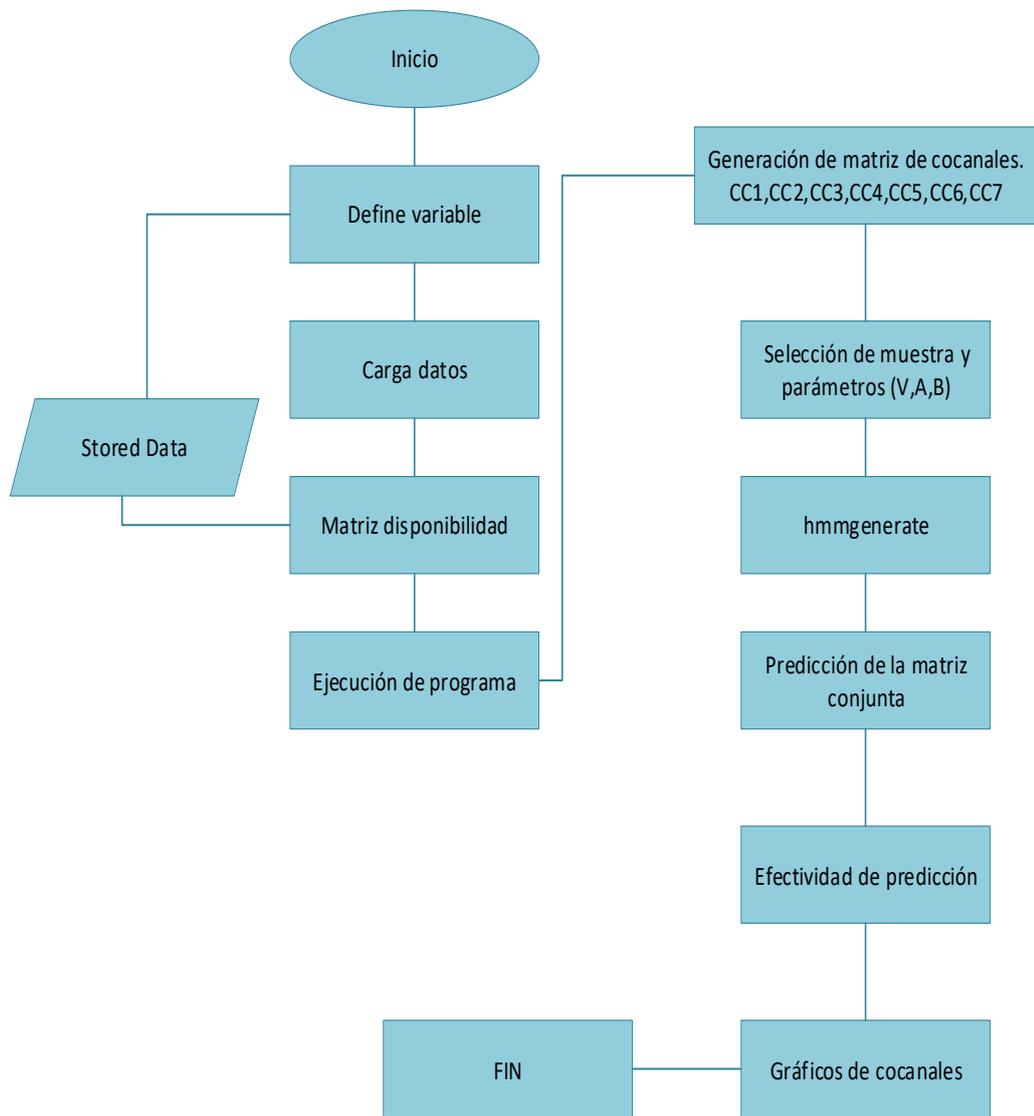


Figura 3.2 Diagrama del algoritmo de predicción.

CAPÍTULO 4

4. Análisis de Resultados

En este capítulo realizaremos el análisis de los resultados obtenidos en nuestra predicción eligiendo 3 días en especial. El mejor día de predicción y el peor día de predicción todas estas comparaciones se hacen a través del porcentaje de error que obtengamos como resultado entre los datos, enfocándonos para este análisis solo en las predicciones de 2 y 3 canales conjuntos debido a que estos poseen una mayor variabilidad de resultados. Para cada día de predicción nuestro algoritmo está hecho de tal manera que coge una muestra de 3 horas del día en curso para comenzar a predecir la disponibilidad de las siguientes 3 horas hasta llegar a las 3 primeras horas del siguiente día.

4.1 Análisis para encontrar el día de mejor y peor predicción

A continuación mostraremos los resultados de este análisis del peor a mejor día de predicción de disponibilidad para a partir de la elección de esos días comenzar a realizar nuestros siguientes análisis para mostrar más graficas tales como la gráfica de función de densidad de probabilidad, grafica de función de distribución acumulada.

Peor día de predicción de disponibilidad de canales conjuntos

El peor día de predicción en nuestro análisis de disponibilidad para 2 y 3 canales conjuntos fue el día miércoles y el día jueves en sus 3 primeras horas.

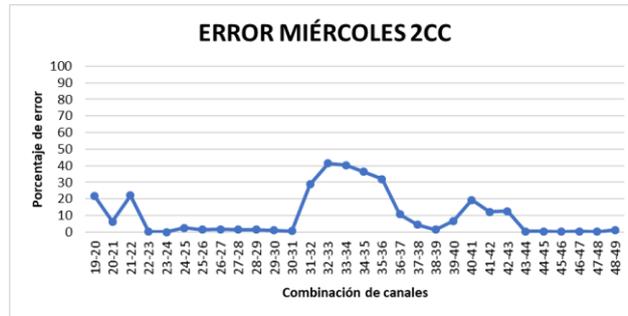


Figura 4.1 Porcentaje de error en predicción de 2 CC día Miércoles.

En la figura 4.1 se observa un error máximo cercano al 40% para la combinación de canales 32-33 y 33-34 a lo que se tiene un error promedio total en todas las combinaciones de 10,37%.



Figura 4.2 Porcentaje de error en predicción de 2 CC día Jueves.

Para el error de predicción de la figura 4.2 se observa un error más alto en relación al día miércoles que es de aproximadamente 80% en las mismas combinaciones de canales conjuntos, esto se debe a que las muestras del último intervalo de 3 horas del día miércoles difieren casi en su totalidad con las primeras 3 horas del día jueves.

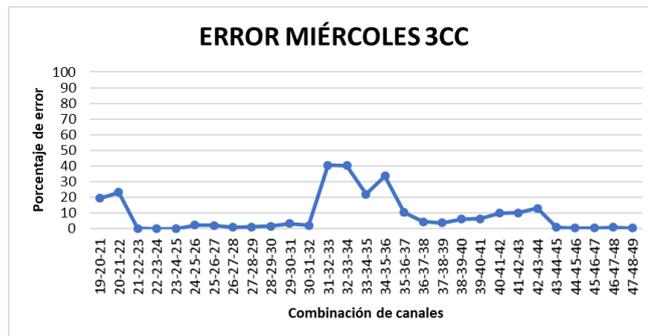


Figura 4.3 Porcentaje de error en predicción de 3 CC día Miércoles.

En la figura 4.3 se observa un error máximo de 40% en 3 canales conjuntos para la combinación de canales 31-32-33. El error promedio total de todas las combinaciones es de 8,93% para ese día.

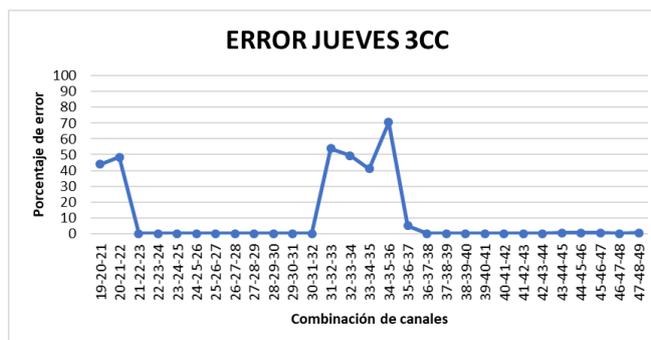


Figura 4.4 Porcentaje de error en predicción de 3 CC día Jueves.

En la figura 4.4 se muestra una gráfica de la predicción para 3 canales conjuntos disponibles en las primeras 3 horas del día jueves, en donde se aprecia un error máximo del 70% dentro de las combinaciones de cocanales 34-35-36.

Mejor día de predicción de disponibilidad de canales conjuntos

El mejor día para la predicción de disponibilidad fue martes y las 3 primeras horas del día miércoles en la combinación de 2 y 3 canales conjuntos mostraremos su análisis a continuación.

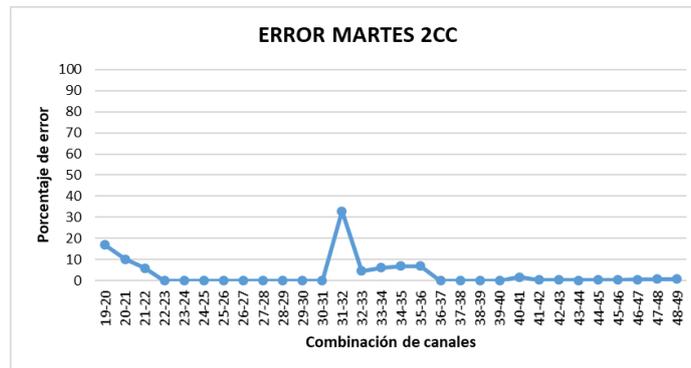


Figura 4.5 Porcentaje de error en predicción de 2 CC día Martes.

En la figura 4.5 se muestra que para 2 canales conjuntos el día martes consta con un error máximo aproximado del 30% en la combinación 31-32, teniendo para este día un error promedio de 3,18%.

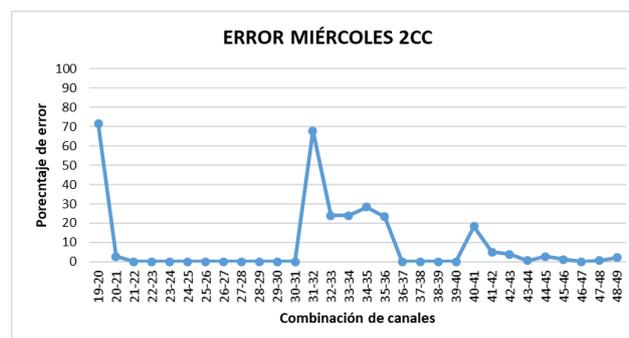


Figura 4.6 Porcentaje de error en predicción de 2 CC día Miércoles.

En la figura 4.6 la gráfica del día miércoles se muestran errores mayores a las del día martes con valores superiores a 60% en las dos combinaciones 19-20 y 31-32. Esto se debe a lo mencionado anteriormente, las últimas muestras del día martes difieren mucho en esas combinaciones comparadas con las muestras de las primeras 3 horas del día miércoles, obteniendo un error promedio de 9,20%.

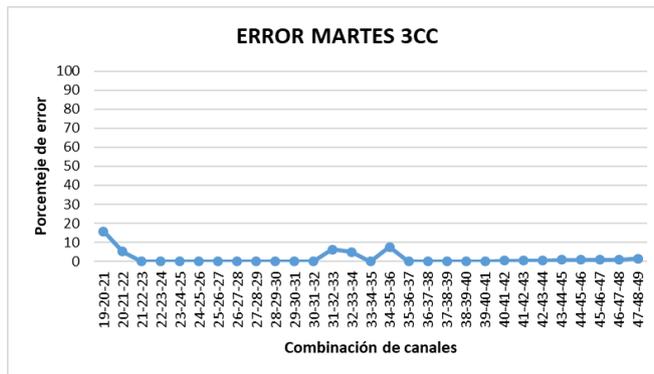


Figura 4.7 Porcentaje de error en predicción de 3 CC día Martes.

Para la figura 4.7 se tiene un error de predicción muy bueno, en la gráfica se observa que 4 combinaciones se disparan en relación a las demás posibles combinaciones en las de canales conjuntos pero principalmente solo una combinación 19-20-21 que tiene un error aproximado del 20% dando un error promedio de todo el día de 1,56%.

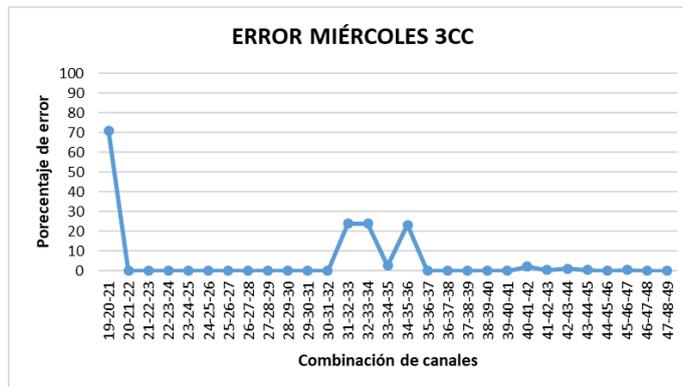


Figura 4.8 Porcentaje de error en predicción de 3 CC día Miércoles.

El error máximo en la figura 4.8 es superior al 80% en la combinación 19-20-21 debido la variabilidad considerable en las muestras mencionadas en los análisis anteriores. En esta grafica de errores de predicción de disponibilidad se tiene un error promedio de 5,17%.

4.2 Resultados

En este apartado se explicará las gráficas que se obtuvieron como resultado del algoritmo de predicción al usar el mejor día de predicción, el cuál fue elegido por tener el mejor valor de efectividad con respecto a los demás día de la semana. También se usó el tamaño de la muestra más efectivo para realizar la predicción.

Análisis mejor día.

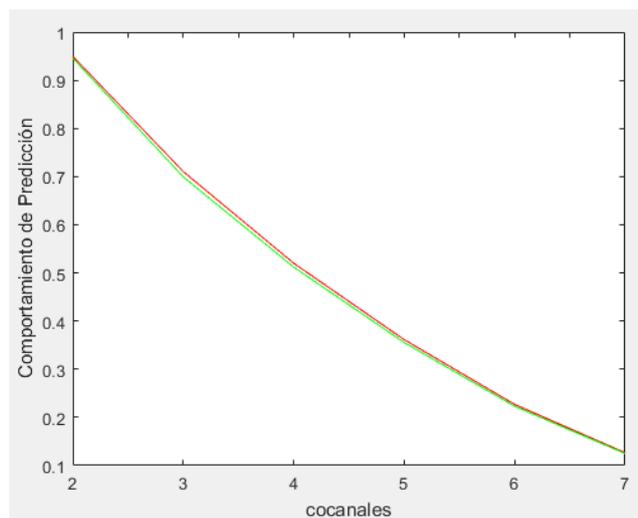


Figura 4.9 Comportamiento de canales conjuntos predichos desde 2CC hasta 7CC.

En la figura 4.9 se muestra la gráfica de los datos teóricos en color rojo y la de los resultados de predicción en color verde. Se aprecia una ligera disminución de porcentaje en todos los cocanales posibles con respecto a los datos teóricos. En el caso de 2CC se tiene una probabilidad de más del 90% de tener 2 canales conjuntos disponibles para cualquier instante de tiempo en toda la banda asignada, teniendo en cuenta que se están tomando los canales de manera inclusiva. Esto quiero decir que para el caso de 2 canales conjuntos disponibles se considera a un canal con sus dos canales adyacentes es decir, el canal anterior y el canal siguiente de un canal cualquiera.

De la misma manera se analiza todos los cocanales, hasta 7 canales conjuntos disponible se pueden obtener en los de la matriz de estados de todos los canales, de esta manera se dice que para 7CC existe una probabilidad muy baja de tener 7 canales conjuntos disponibles a lo largo de todo la banda en estudio.

Análisis particular de cocanales disponibles.

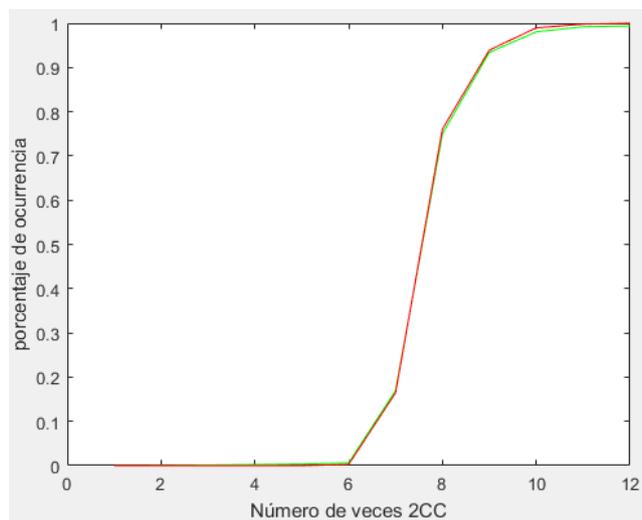


Figura 4.10 Comportamiento para 2CC disponibles.

Con los resultados obtenidos en la gráfica 4.10, se puede garantizar la presencia de hasta 10 combinaciones de 2 canales conjuntos disponibles, por su alto porcentaje de ocurrencia. La diferencia del comportamiento entre los valores predichos y los teóricos es mínima.

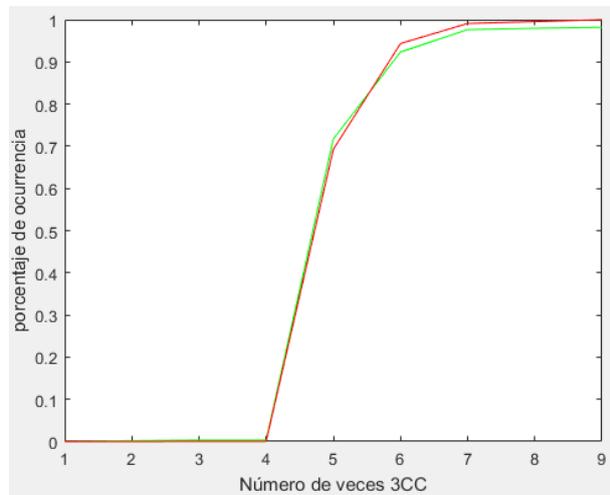


Figura 4.11 Comportamiento para 3CC disponibles.

La gráfica 4.11 garantiza la presencia de hasta 5 veces la posibilidad de tener 3 canales conjuntos disponibles por su alto nivel de probabilidad de ocurrencia en la predicción. Para el caso de 3CC se puede apreciar que la diferencia entre la gráfica de valores teóricos y predichos no deja de ser insignificante.

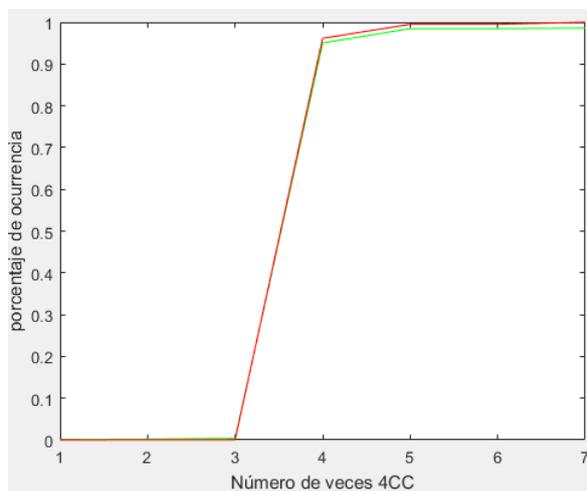


Figura 4.12 Comportamiento para 4CC disponibles.

En la gráfica 4.12 se garantiza la presencia de tener hasta 4 veces, 4 canales conjuntos disponibles por su alto nivel de probabilidad de predicción.

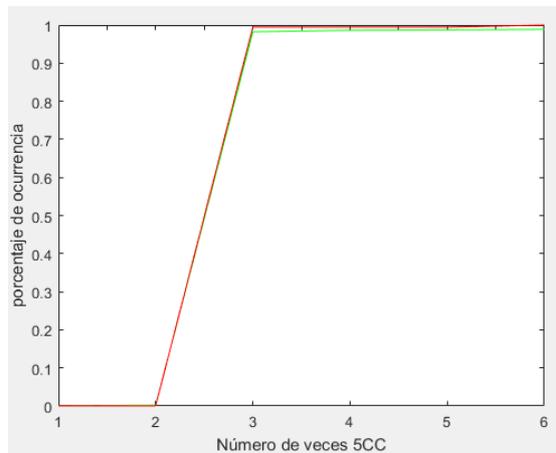


Figura 4.13 Comportamiento para 5CC disponibles.

En la gráfica 4.13 también se indica la presencia de hasta 3 veces la posibilidad de tener 5 canales conjuntos disponibles con un porcentaje de ocurrencia mayor al 90%.

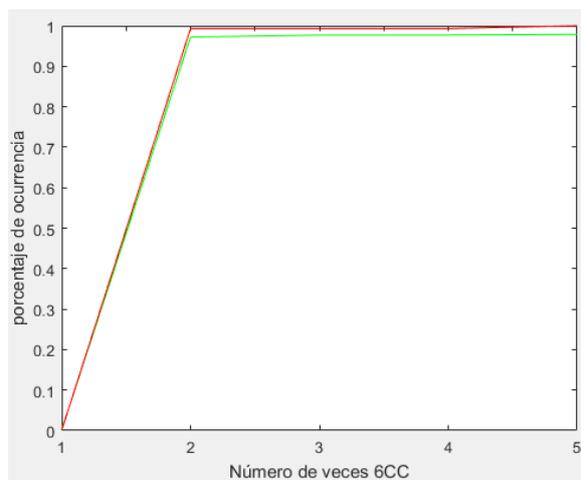


Figura 4.14 Comportamiento para 6CC disponibles.

De igual manera En la gráfica 4.14 puede decir que basándose en el número de veces predicho, se garantiza la presencia de hasta 2 veces la posibilidad de tener 6 canales conjuntos disponibles con un porcentaje de ocurrencia superior al 80%.

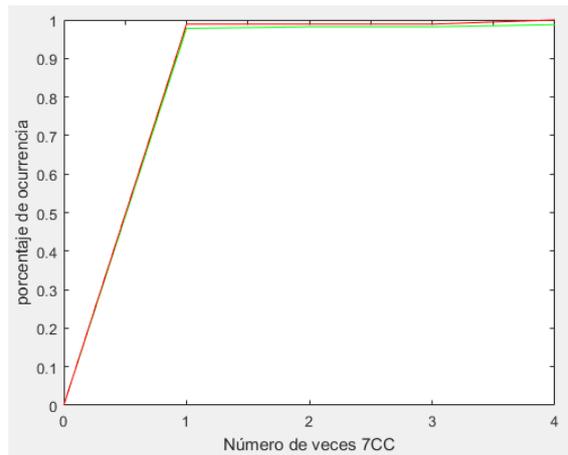


Figura 4.15 Comportamiento para 7CC disponibles.

En la gráfica 4.15 se muestra la presencia de tener 1 vez, 7 canales conjuntos disponibles con una ocurrencia mayor al 80%.

Conclusiones

Para obtener una matriz de estados óptimas para este proyecto se varió los valores de umbral con la finalidad de poder observar cual presentaba la mejor variabilidad de canales disponibles y ocupados llegando a la conclusión que el mejor umbral fue -65 dBm para los datos provistos.

Luego de ejecutar el programa y analizar los resultados con diferentes tamaños de muestra se pudo concluir que el rango óptimo de tiempo para el algoritmo predictivo es de 3 horas que equivale a 180 muestras, ya que con ese dio un porcentaje de error bajo en comparación a rangos de 6 y 12 horas.

Se pudo concluir para la Figura 4.1 que en la combinación de canales conjuntos 32-33 tuvimos un error de 41,35% en el peor caso y de igual manera se obtuvo un error promedio total del día de 4,52% tomando en cuenta que para este mismo día si se tuvo un error alto en los canales 31-32 esto se debe a la variabilidad de estados en nuestra muestra. Para disminuir este promedio se puede descartar las combinaciones de canales conjuntos con alto porcentaje de error aquellas que estén cerca de 40% (31-32, 32-33, 33-34, 34-35 y 35-36) porque no se puede garantizar disponibilidad para dichos canales.

Analizando las gráficas obtenidos entre porcentaje de error del peor y mejor día demostramos que nuestro algoritmo predictivo tiene combinaciones de canales conjuntos en los cuales aseguramos una buena predicción, otorgándole una buena confiabilidad a quien use el algoritmo creado.

Recomendaciones

Antes de realizar los análisis de los parámetros necesarios en HMM es necesario escoger el valor correcto de umbral para evitar errores en la matriz de disponibilidad y así asegurar la confiabilidad de las predicciones que se realizaran a partir de dicha matriz.

Se recomienda verificar que la dimensión de la matriz de estado esté completa, es decir que no haya huecos en los tiempos de medición de la señal, de igual manera se debe verificar que estén en orden los canales para evitar errores de predicción al no encontrar una secuencia de datos completos; ya que para poder hacer la predicción el algoritmo recorre cada posición y al encontrar vacíos no se puede asegurar una predicción con alta confiabilidad.

Para mejorar la predicción de los canales conjuntos con porcentaje de errores altos hacia futuros proyectos en relación al modelo oculto de Markov, se debe tomar una muestra más pequeña en las combinaciones mayores de 10% asegurando una eficacia mayor.

Bibliografía

- [1] CISCO Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019, Febrero, 2015, CISCO Systems.
- [2] Qing Zhao; Sadler, B.M., "A Survey of Dynamic Spectrum Access," Signal Processing Magazine, IEEE , vol.24, no.3, pp.79,89, May 2007
- [3] Julio Aguilar Rentería, Andres Navarro Cadavid. "Radio Cognitiva-Estado del arte". Sistemas & Telemática, Vol.9.No.16, pp. 31-53, Mar. 2011.
- [4] INEC (2015). Tecnologías de la información y Comunicaciones (TIC'S) 2015 [online]. Disponible en: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/TIC/2015/Presentacion_TIC_2015.pdf
- [5] Raikel Bordón López, Samuel Montejo Sánchez. "La Radio Cognitiva y su Impacto en el Uso Eficiente del Espectro de Radio", RIELAC, vol.XXXVI, pp. 42-55, Enero, 2015.
- [6] Ericsson Mobility Report, Junio 2015, Ericsson.
- [7] Jorge Luis Gómez P. "Modelado de la disponibilidad de canales de la banda UHF-TV para el uso potencial de sistemas con acceso oportunista al espectro (OSA) en una zona urbana", Trabajo de Tesis. Facultad de Ingeniería eléctrica y computación. Espol, Guayaquil, Ecuador, 2015.
- [8] Grupo del Espectro, "Introducción al estado de la situación de los "TV White Spaces"y "LSA" propiciados por la Radio Cognitiva", Colegio oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones, Madrid, 2013.
- [9] Verónica S. Bazurto S. y Jorge A. Espinoza V., "Diseño y análisis de un algoritmo predictivo de n-canales conjuntos disponibles en el rango 512-698 MHz basado en cadenas de Markov", Trabajo de Tesis, Facultad de Ingeniería eléctrica y computación, Espol, Guayaquil, Ecuador, Marzo 2015.
- [10] Iván Folgueira Bande, "Síntesis de voz mediante Modelos Ocultos de Markov", Trabajo de Tesis, UPC, Barcelona, España, Noviembre 2008.

- [11] Sara Prada A. "Cadenas de Markov en la investigación del Genoma ", Tesis de Maestría, Universidad Santiago de Compostela, España, Julio 2013.
- [12] Guillermo Cortes M. "Reconocimiento de señales sismo-volcánicas mediante canales específicos basados en modelos ocultos de Markov", Tesis de doctorado. Universidad de Granada, España, Noviembre 2015.
- [13] José M. Costa, (2008, Febrero 27), "Las tecnologías de radiocomunicaciones de la próxima generación flexibilizarán la utilización del espectro", [online]. Disponible en:<https://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2008&issue=02&page=newRadioTech&ext=html>
- [14] Alonso Llanos. "Gestión del espectro radioeléctrico en Ecuador Nueva modalidad para radiodifusión y televisión abierta", Univ. Andina Simón Bolívar, Quito, Ecuador: Corporación Editorial Nacional, 2013.
- [15] Luis F. Rodríguez, "Telecomunicaciones," Centro de Radioastronomía y Astrofísica, UNAM y El colegio Nacional, México, 2008.
- [16] Dell, "Systems Information Guide", 1era edición, Estados Unidos, Dell Computer Corporation, 2002.
- [17] Oficina de Radiocomunicaciones de la UIT, "Comisiones de Estudio del UIT-R", UIT, Ginebra, 2010.
- [18] Comisión Interamericana de Telecomunicaciones Organización de los Estados Americanos, "Política de Telecomunicaciones para las Américas", Libro Azul, Edición 2005, Ginebra, 2005.
- [19] Daniel Ospina, Andrés F. Ocampo y Roberto Hincapié. "Aplicación de esquemas de Acceso Oportunista al Espectro en ambientes inalámbricos heterogéneos", Revista en Telecomunicaciones e Informática. Vol. 1, No. 1 en redes IPTV con almacenamiento distribuido de contenidos pp. 49 – 71, Junio, 2011.
- [20] Fernando Soriano B. y Diana Urriola E. "Algoritmo distribuido de asignación de canales para redes de comunicación inalámbricas con acceso oportunista". Trabajo

de Tesis. Facultad de Ingeniería eléctrica y computación, Espol, Guayaquil, Ecuador, 2015

[21] Qing Zhao; Sadler, B.M., "A Survey of Dynamic Spectrum Access," Signal Processing Magazine, IEEE, vol.24, no.3, pp.79,89, May 2007

[22] M. Al-Husseini, K. Y. Kabalan, A. El-Hajj y C. G. Christodoulou, «Reconfigurable Microstrip Antennas for Cognitive Radio,» de Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications - Capitulo 14, Ahmed Kishk, 2013, p. 27.

[23] Jaime Guzhñay L. "Estudio y análisis del apagón analógico para la migración de la televisión analógica a digital en el periodo Diciembre 2016 a Diciembre 2018", Tesis de Tesis. Facultad de educación técnica para el desarrollo. Univ. Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, Marzo, 2017.

[24] Luis Rincón, Introducción a los Procesos Estocásticos, México DF: Facultad de Ciencias UNAM, 2011

[25] Diego Nougra, "Variables Aleatorias y Distribuciones de Probabilidades", Probabilidad y Estadística, Ecuador, 2015.

[26] Julián Pérez Porto y Ana Gardey. Definición de estado. Publicado: 2008. Actualizado: 2012.

[27] Julián Pérez Porto y Ana Gardey. Definición de evento. Publicado: 2009. Actualizado: 2009.

[28] Universidad Carlos III de Madrid, "Cadenas de Markov", Estadística Actuarial II, España, 2004.

[29] Ana López G. "Modelos ocultos de Markov: una aplicación a las finanzas", Tesis de maestría. Matemáticas aplicadas e industriales. Univ. Autónoma metropolitana, México D.F, México, Junio, 2016.

Anexos

Análisis día intermedio.

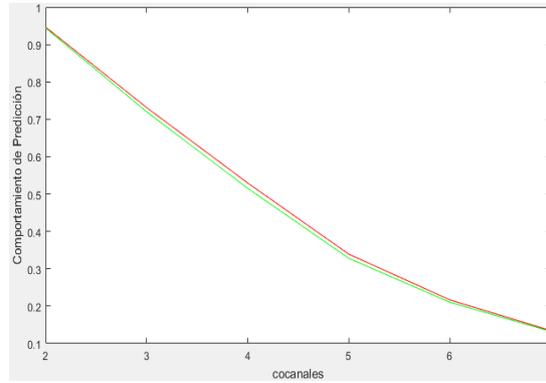


Figura A1 Comportamiento de canales conjuntos predichos desde 2CC hasta 7CC.

Análisis particular de cocanales disponibles.

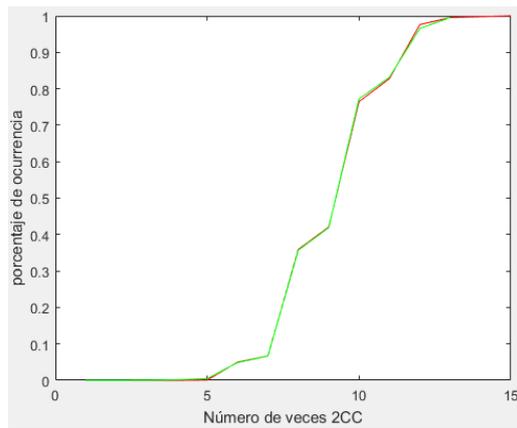


Figura A2 Comportamiento para 2CC disponibles.

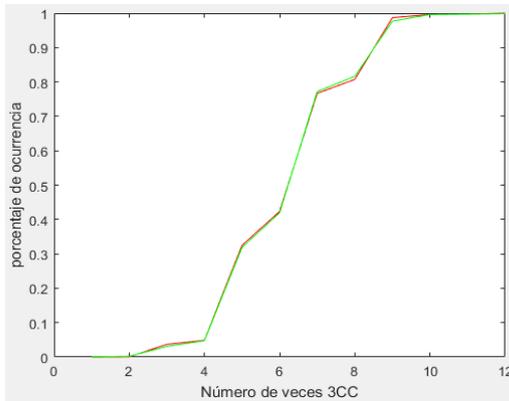


Figura A3 Comportamiento para 3CC disponibles.

Análisis peor día.

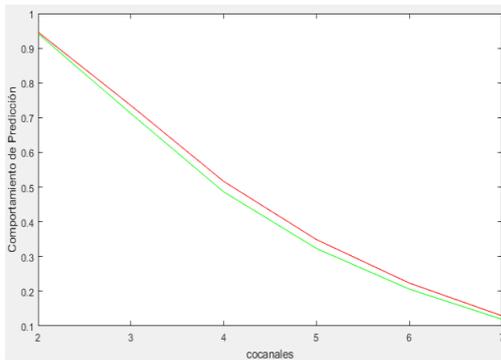


Figura A4 Comportamiento de canales conjuntos predichos desde 2CC hasta 7CC.

Análisis particular de cocanales disponibles.

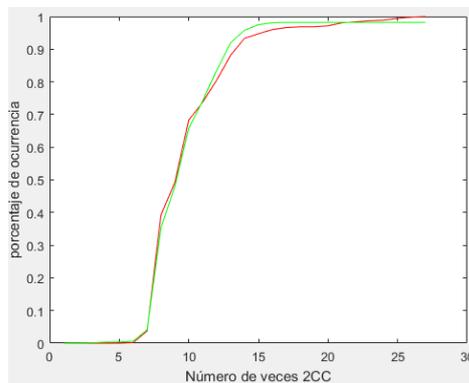


Figura A5 Comportamiento para 2CC disponibles.

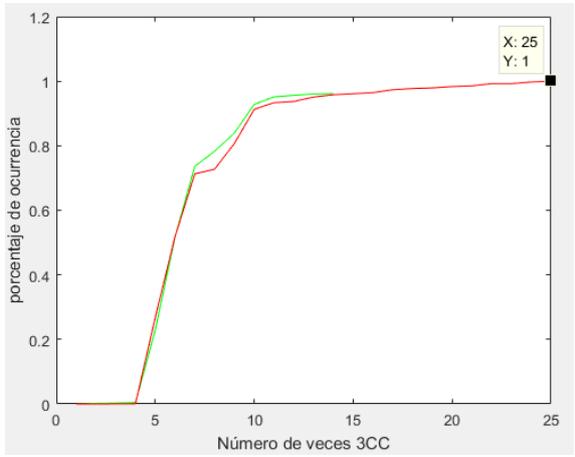


Figura A6 Comportamiento para 3CC disponibles.