



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Diseño y evaluación de una red de radio cognitiva utilizando un modelo de
Márkov para garantizar calidad de servicio en términos de probabilidad de
bloqueo

Trabajo de Titulación para optar al título de:
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

Autor:

María Fernanda Macas Tuapanta

Tutor:

Mgs. José Luis Jinez Tapia

Riobamba, Ecuador. 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **MARÍA FERNANDA MACAS TUAPANTA**, con cédula de ciudadanía **0605313113**, autor del trabajo de investigación titulado: **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA RED DE RADIO COGNITIVA UTILIZANDO UN MODELO DE MÁRKOV PARA GARANTIZAR CALIDAD DE SERVICIO EN TÉRMINOS DE PROBABILIDAD DE BLOQUEO**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 30 de enero del 2025.



María Fernanda Macas Tuapanta

C.I: 060531311-3

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **José Luis Jinez Tapia** catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA RED DE RADIO COGNITIVA UTILIZANDO UN MODELO DE MÁRKOV PARA GARANTIZAR CALIDAD DE SRVICIO EN TÉRMINOS DE PROBABILIDAD DE BLOQUEO**, bajo la autoría de **María Fernanda Macas Tuapanta**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 30 días del mes de enero de 2025.



Msc. José Luis Jinez Tapia

C.I: 0602899007

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación: Diseño y evaluación de una red de radio cognitiva utilizando un modelo de Márkov para garantizar calidad de servicio en términos de probabilidad de bloqueo, presentado por María Fernanda Macas Tuapanta, con cédula de identidad número 060531311-3, bajo la tutoría del Msc. José Luis Jinez Tapia; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 30 de enero del 2025.

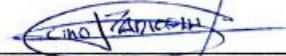
PhD. Luis Patricio Tello Oquendo
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



PhD. Marlon Danilo Basantes Valverde
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



PhD. Ciro Diego Radicelli García
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

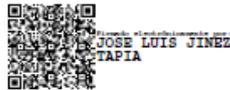


CERTIFICADO ANTIPLAGIO

CERTIFICACIÓN

Que, **Macas Tuapanta María Fernanda** con CC: **0605313113**, estudiante de la Carrera de **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERIA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado " **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UNA RED DE RADIO COGNITIVA UTILIZANDO UN MODELO DE MÁRKOV PARA GARANTIZAR CALIDAD DE SERVICIO EN TÉRMINOS DE PROBABILIDAD DE BLOQUEO.**", cumple con el **4%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 23 de enero de 2025



Mgs. José Luis Jínez Tapia
TUTOR TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación se lo dedico a Dios que me ha llenado de bendiciones a lo largo de mi formación estudiantil, permitiéndome cumplir con éxito las metas que me he planteado a lo largo de mi vida.

A mi querida madre, Mariana Tuapanta, quien me ha inculcado todos mis valores y ha estado apoyándome en cada logro y cada tropiezo de mi vida, incentivándome a cada día ser una mejor persona, quien a pesar de las adversidades me ha llenado de amor y alegría y a ti papá que, aunque estés en el cielo, tu legado de perseverancia y sacrificio continúa inspirándome cada día. Este logro también es tuyo.

A mis hermanos quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional en cualquier decisión de mi vida y han sido un pilar fundamental para alcanzar mis metas.

María Fernanda Macas Tuapanta

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a mi querido Dios por ayudarme a superar todos los obstáculos que se presentaron en el transcurso de mi vida y poder llegar exitosamente hasta este punto.

A mi familia quienes me brindaron sus consejos, me llenaron de amor y de apoyo incondicional para cumplir cada sueño propuesto en mi vida.

A mi apreciado tutor Mgs. José Jinez y PhD. Luis Tello quienes pusieron toda su confianza en mí y quienes me guiaron en cada punto de desarrollo de este proyecto y de mi formación personal.

A mis docentes quienes fueron pilares fundamentales en mi formación estudiantil, mismos que día a día compartían sus conocimientos para formarme como un profesional de excelencia.

A mis queridos amigos con quienes he compartido esta etapa importante de mi vida, quienes me han acompañado a cumplir muchos de mis sueños y han estado conmigo incondicionalmente.

María Fernanda Macas Tuapanta

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRACT

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO I..... | 14 |
| 1.1 Introducción | 14 |
| 1.2 Planteamiento del problema y justificación | 15 |
| 1.2.1 Problema y justificación | 15 |
| 1.3 Objetivos | 16 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 16 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 16 |
| CAPÍTULO II..... | 17 |
| 2.1 Marco Teórico | 17 |
| 2.1.1 Telefonía Móvil | 17 |
| 2.1.1.1 Telefonía móvil de primera generación (1G) | 17 |
| 2.1.1.2 Telefonía móvil de segunda generación (2G)..... | 17 |
| 2.1.1.3 Telefonía móvil de 2.5G | 17 |
| 2.1.1.4 Telefonía móvil de tercera generación (3G)..... | 17 |
| 2.1.1.5 Telefonía móvil de cuarta generación (4G)..... | 17 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| 2.1.1.6 | Telefonía móvil de quinta generación (5G)..... | 18 |
| 2.1.2 | Radio Cognitiva..... | 18 |
| 2.1.2.1 | Sistema de Radio Cognitiva | 19 |
| 2.1.2.2 | Ciclo Cognitivo | 19 |
| 2.1.2.3 | Técnicas de detección del espectro..... | 20 |
| 2.1.2.3.1 | Detección de energía | 21 |
| 2.1.2.3.2 | Detección de filtro adaptado..... | 21 |
| 2.1.2.3.3 | Detección ciclo estacionaria | 21 |
| 2.1.2.3.4 | Detección basada en covarianza | 21 |
| 2.1.3 | Problemas cognitivos comunes de la radio..... | 22 |
| 2.1.4 | Tipos de usuarios en una red de radio cognitiva | 22 |
| 2.1.4.1 | Acceso dinámico al espectro (DSA)..... | 23 |
| 2.1.5 | Modelo de Márkov | 24 |
| 2.1.5.1 | Componentes de un modelo de Márkov | 24 |
| 2.1.5.2 | Propiedades de un modelo de Márkov | 25 |
| 2.1.6 | Calidad de servicio en términos de probabilidad de bloqueo..... | 26 |
| 2.1.7 | Estado del arte | 26 |
| CAPÍTULO III | | 27 |
| 3.1 | Metodología de la investigación | 27 |
| 3.1.1 | Tipo de investigación | 27 |
| 3.1.2 | Métodos y técnicas de recolección de datos..... | 27 |
| 3.1.2.1 | Método analítico | 27 |
| 3.1.2.2 | Modelo de simulación | 27 |
| 3.1.2.2.1 | Operación de usuarios en escala de tiempo..... | 29 |
| 3.1.2.2.1 | Parámetros de rendimiento..... | 31 |
| 3.1.3 | Población y muestra | 31 |
| CAPÍTULO IV | | 32 |

| | | |
|------------------|--------------------------------------|----|
| 4.1 | Resultados | 32 |
| 4.1.1 | Análisis de tasa de llegada..... | 32 |
| CAPÍTULO V | | 45 |
| 5.1 | Conclusiones y Recomendaciones | 45 |
| 5.1.1 | Conclusiones..... | 45 |
| 5.1.2 | Recomendaciones | 46 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Muestra de manera gráfica las generaciones de telefonía móvil [12]. | 18 |
| Figura 2. Ciclo cognitivo | 20 |
| Figura 3. Ilustración del acceso dinámico al espectro entre usuarios primarios y secundarios. | 24 |
| Figura 4. Sistema de Radio Cognitiva. | 28 |
| Figura 5. Descomposición en escala de tiempo. | 29 |
| Figura 6. Diagrama de transición de estado. Sistema de radio cognitiva. | 29 |
| Figura 7. Estado (i,j) . | 30 |
| Figura 8. Estado de absorción. | 30 |
| Figura 9. Curvas resultantes de la probabilidad de bloqueo de usuarios primarios (UP) con valores entre 10 y 200 de tasa de llegada. | 32 |
| Figura 10. Curvas resultantes de la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 200 de tasa de llegada. | 34 |
| Figura 11. Curvas resultantes del análisis de Throughput de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 200 de tasa de llegada. | 35 |
| Figura 12. Curvas resultantes del análisis de Terminación Forzosa de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 200 de tasa de llegada. | 36 |
| Figura 13. Curvas resultantes del análisis de la probabilidad de bloqueo de usuarios primarios (UP) con valores entre 10 y 100 canales. | 38 |
| Figura 14. Curvas resultantes del análisis de la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 100 canales. | 39 |
| Figura 15. Curvas resultantes del análisis de Throughput de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 100 canales. | 41 |
| Figura 16. Curvas resultantes del análisis de Terminación Forzosa de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 100 canales. | 42 |
| Figura 17. Relación entre el número de canales y el costo computacional en términos del número de ecuaciones de una matriz Q. | 43 |
| Figura 18. Relación entre el número de canales y el costo computacional, en donde el mismo se midió en términos de ejecución en segundos. | 44 |

RESUMEN

Las redes de radio cognitiva han surgido como una solución innovadora para gestionar la creciente demanda de espectro en las comunicaciones inalámbricas. La competencia por el espectro entre tecnologías 5G, redes privadas y el futuro 6G exige una gestión eficiente del mismo. Las redes de radio cognitiva permiten a los dispositivos acceder y utilizar dinámicamente el espectro disponible, lo cual es crucial para su desarrollo en diversos entornos; no obstante, se presentan desafíos significativos en el despliegue de las tecnologías de radio cognitiva y su implementación para desarrollar nuevas oportunidades de acceso a plataformas de comunicación emergentes.

Esta investigación plantea un modelo de Márkov como herramienta analítica para representar las transiciones entre diferentes estados de ocupación del canal de una red de radio cognitiva y evaluar su rendimiento en términos de probabilidad de bloqueo. Se consideran diversos escenarios en función de la carga de usuarios y configuraciones en el número de canales disponibles para cada tipo de usuario. Los usuarios primarios (titulares de la licencia) tienen acceso prioritario y se les debe asegurar una calidad de servicio determinada, mientras que los usuarios secundarios acceden al espectro de forma oportunista.

El modelo planteado permite analizar métricas de rendimiento adicionales para los usuarios secundarios como la probabilidad de terminación forzosa y el throughput de la red. Los resultados indican que mientras más alto sea el número de canales, más oportunidades tienen los usuarios secundarios para acceder a la red con un throughput estable. El costo computacional del modelo incrementa a medida que el número de canales de la red aumenta; sin embargo, permite obtener los resultados en unos segundos para configuraciones de red medianas.

Palabras claves: Modelo de Márkov, usuarios primarios, usuarios secundarios, redes de radio cognitivas.

ABSTRACT

Cognitive radio networks have emerged as an innovative solution to manage the growing demand for spectrum in wireless communications. Competition for spectrum between 5G technologies, private networks, and the future 6G requires efficient spectrum management. Cognitive radio networks allow devices to dynamically access and use available spectrum, which is crucial for their development in various environments; however, there are significant challenges in deploying cognitive radio technologies and their implementation to develop new opportunities for emerging accessing communication platforms. This research proposes a Markov model as an analytical tool to represent the transitions between different channel occupancy states of a cognitive radio network and evaluate its performance in terms of blocking probability. Different scenarios are considered as a function of user load and configurations in the number of channels available for each type of user. Primary users (licensees) have priority access and must be assured a certain quality of service, while secondary users access the spectrum opportunistically. The model allows analyzing additional performance metrics for secondary users such as the probability of forced termination and network throughput. The results indicate that the higher the number of channels, the more opportunities secondary users have to access the network with stable throughput. The computational cost of the model increases as the number of channels in the network increases; however, it allows results to be obtained in a few seconds for medium-sized network configurations.

Keywords: Markov model, primary users, secondary users, cognitive radio networks.



Reviewed by:

Mgs. Hugo Solis Viteri.

ENGLISH PROFESSOR

CAPÍTULO I

1.1 Introducción

En el panorama actual de las comunicaciones inalámbricas, las redes de radio cognitivas han emergido como una solución innovadora para gestionar la creciente demanda de espectro, resulta cada vez más importante desarrollar nuevos métodos de acceso y un mejor uso de los recursos del mismo. Se anticipa que las oportunidades y beneficios de las redes privadas emergentes impulsarán su adopción generalizada por parte de organizaciones industriales y comunitarias de diversos tamaños, esto exigirá un acceso flexible y adaptable al espectro, para satisfacer una amplia gama de casos de uso en distintas ubicaciones y entornos operativos.

Con la competencia actual por el espectro entre el 5G, satélites, redes privadas y la posible asignación de frecuencias para el futuro 6G, está claro que la gestión, detección y compartición eficientes del espectro son muy importantes. Estas redes permiten a los dispositivos inteligentes acceder y utilizar de manera dinámica el espectro radioeléctrico disponible. No obstante, se presentan desafíos significativos y diferentes potencialidades de las tecnologías de Radio Cognitiva en el desarrollo de nuevas oportunidades de acceso a plataformas de comunicación y los desafíos en su implementación.

Para enfrentar estos desafíos, los modelos de Márkov ofrecen un enfoque analítico efectivo para evaluar el desempeño de una red de Radio Cognitiva, un modelo de Márkov permite representar las transiciones entre diferentes estados de ocupación del canal, facilitando la evaluación de la probabilidad de bloqueo en diversos escenarios de carga de usuarios y condiciones de uso del espectro. Al utilizar este modelo, es posible analizar el diseño de la red y prever como los cambios en la configuración del sistema, especialmente en la garantía de una calidad de servicio robusta en términos de probabilidad de bloqueo, utilizando el modelo de Márkov [1]. La gestión efectiva del espectro, la minimización de la interferencia y la garantía de calidad de servicio son aspectos críticos en el diseño y operación de redes de radio cognitivas [2].

Con respecto a la calidad de servicio (QoS), los usuarios primarios son los titulares principales de las licencias para la banda de espectro de interés, en general cuentan con acceso prioritario al espectro y están sujetos a restricciones específicas de QoS que deben ser aseguradas, mientras que los usuarios secundarios tienen la capacidad de acceder al espectro cuya licencia ha sido otorgada a los usuarios primarios. Por lo tanto, son considerados usuarios secundarios en el ámbito del espectro inalámbrico y comúnmente se les refiere como radios cognitivas [3].

1.2 Planteamiento del problema y justificación

1.2.1 Problema y justificación

En una red de radio cognitiva, básicamente se tiene un canal primario que es compartido por usuarios primarios y secundarios, un canal secundario que solo lo utilizan los usuarios secundarios y hay un número total de canales en el sistema que de ser compartido.

El problema central en las redes móviles es la asignación restrictiva de bandas de frecuencia, esto conduce a una baja eficiencia en la utilización de dichas bandas o una saturación considerable en los servicios ofrecidos, se determinan cuatro puntos principales de la problemática: caracterización de la capa física, esquemas de enrutamiento y seguridad, y desafíos en la implementación. Estos aspectos son cruciales para mejorar el rendimiento y la eficacia de las redes móviles y abordar los problemas de capacidad y QoS [4].

Dentro de una red de radio cognitiva QoS se define como la medida de rendimiento de un servicio de red y su capacidad para cumplir ciertos requisitos como, por ejemplo: el parámetro de retardo, la tasa de error y el ancho de banda. La QoS es esencial para garantizar un rendimiento adecuado en términos de la transmisión de datos, la detección de canales libres y soluciones desde el punto de vista de reconfiguración y adaptación. Uno de los problemas de la red de radio cognitiva es que los usuarios secundarios no tienen privilegios al momento de conectarse a la red [5].

Así mismo, el grado de complejidad de las redes de comunicación modernas hace que mediante un modelo de Márkov se simule su dinámica de tráfico y, por tanto, la determinación de sus parámetros de rendimiento e implementación. Sin embargo, una característica común de estas redes es que gestionan múltiples tipos de flujos de tráfico que operan en diferentes escalas de tiempo. Esta separación de escalas de tiempo se puede aprovechar para soluciones en el censado espectral punto de partida para la gestión. Siguiendo este enfoque, se propone un método de solución con un modelo de Márkov para garantizar QoS en términos de probabilidad de bloqueo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar y evaluar una red de radio cognitiva utilizando un modelo de Márkov para garantizar calidad de servicio en términos de probabilidad de bloqueo

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar un modelo de Márkov que permita analizar una red de radio cognitiva para garantizar calidad de servicio en su configuración.
- Determinar la probabilidad de bloqueo como métrica de análisis de rendimiento de la red de radio cognitiva.
- Simular la red de radio cognitiva utilizando el modelo de Márkov determinado.
- Evaluar el rendimiento de la red de radio cognitiva para garantizar una calidad de servicio predeterminada en términos de probabilidad de bloqueo.

CAPÍTULO II

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Telefonía Móvil

La telefonía móvil es un sistema de comunicación inalámbrica que permite a los usuarios realizar y recibir llamadas telefónicas, enviar y recibir mensajes de texto, acceder a los servicios de datos como internet, correo electrónico y aplicaciones móviles [6].

Actualmente, se ha ido incrementando el número de usuarios con acceso a la telefonía móvil, por lo que es necesario que se empleen nuevos desarrollos en los servicios de la misma, específicamente para los usuarios sin licencia.

La telefonía móvil ha evolucionado a través de diferentes generaciones como:

2.1.1.1 Telefonía móvil de primera generación (1G)

La primera generación de telefonía móvil nace en el año 1979, estos sistemas utilizaban señales de radio de tipo analógico para transmitir voz, esto implicaba que la calidad de llamada era baja, ya que estaba sujeta a interferencias y ruidos, también se consideraba obsoleta debido a sus limitaciones de capacidad limitada, calidad de servicio y falta de flexibilidad [7].

2.1.1.2 Telefonía móvil de segunda generación (2G)

La segunda generación de telefonía móvil nace en el año 1990, tiene un avance significativo con respecto a la tecnología de primera generación (1G), al introducir el uso de sistemas digitales para la transmisión de voz y mensajes de texto cortos, esto dio una mejoría notable en la calidad de llamadas, reduciendo el ruido e interferencias [8].

2.1.1.3 Telefonía móvil de 2.5G

Esta generación de telefonía móvil tuvo su lanzamiento en el año 2000, fue una evolución intermedia entre la segunda generación (2G) y la tercera generación (3G) de redes móviles, ya que introdujo mejoras en la transmisión de datos por paquetes que permitieron el acceso a internet móvil y otros servicios que no eran posibles con las tecnologías 2G básicas [9].

2.1.1.4 Telefonía móvil de tercera generación (3G)

La tercera generación de telefonía móvil nace en el año 2001, es una tecnología móvil inalámbrica que permite la transmisión de voz y datos a velocidades más altas que su predecesor, el 2G, permitiendo la expansión de servicios como internet móvil, videollamadas y aplicaciones más avanzadas dependiendo de la red y las condiciones. Esto permite la navegación web más rápida, descarga de archivos y uso de aplicaciones multimedia [10].

2.1.1.5 Telefonía móvil de cuarta generación (4G)

La cuarta generación de telefonía móvil nace en el año 2010, tiene un avance significativo en las comunicaciones móviles, ya que ha ido mejorando las velocidades de transmisión de datos y la capacidad de soportar aplicaciones multimedia y servicios avanzados de internet, sus principales características son: velocidad ultra rápida (ofrece velocidades de conexión

más altas, lo que permite una experiencia de navegación web más fluida y descargas más rápidas), menor latencia (es menor en las redes 4G , lo que se traduce a una experiencia de usuario más ágil y responsiva), mayor capacidad de red (soportan un mayor número de usuarios simultáneos, lo que garantiza una conexión más estable incluso en áreas con alta densidad de tráfico) [11].

2.1.1.6 Telefonía móvil de quinta generación (5G)

La quinta generación de telefonía móvil nace en el año 2020, las mismas que fueron implementadas en algunos países del mundo, representan un gran salto en la evolución de las redes móviles ya que promete velocidades de descarga mucho más rápidas, una latencia ultra baja y la capacidad de conectar un gran número de dispositivos simultáneamente, sus principales beneficios son: experiencia de usuarios mejorada, nuevos servicios y aplicaciones [11].

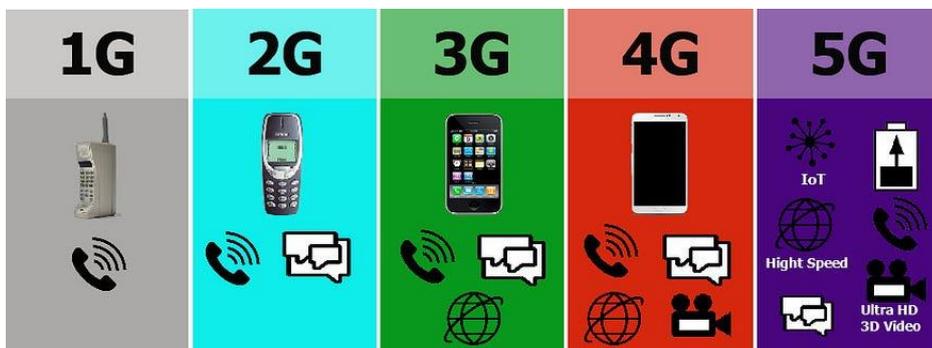


Figura 1. Muestra de manera gráfica las generaciones de telefonía móvil [12].

2.1.2 Radio Cognitiva

Es una tecnología que habilita a las redes de nueva generación para aprovechar y compartir el espectro de manera oportunista. Las redes que emplean esta tecnología son capaces de proporcionar un amplio ancho de banda a los usuarios móviles mediante el uso de arquitecturas inalámbricas heterogéneas y tácticas dinámicas de acceso al espectro [13]. Dado que el espectro disponible experimenta fluctuaciones significativas y existen requisitos de QoS para diversas aplicaciones, las redes de radio cognitiva deben llevar a cabo las siguientes acciones: identificar las porciones del espectro que están disponibles, seleccionar el canal óptimo disponible, coordinar el acceso a este canal con otros usuarios y liberar el canal cuando se detecta la presencia de un usuarios con licencia [14].

Los sistemas de comunicación por radio convencionales funcionan mediante la transmisión y recepción de datos en canales específicos del espectro asignados previamente, lo cual ayuda a evitar interferencias y a mantener transmisiones estables. Sin embargo, con el incremento acelerado de dispositivos conectados y la saturación progresiva del espectro de radiofrecuencia (RF), los recursos de espectro disponibles de espectro para soportar nuevos

dispositivos están disminuyendo rápidamente. Algunos usuarios enfrentan altos costos de licencia a pesar de que solo requieren realizar transmisiones ocasionales. Sin embargo, estudios han evidenciado que los canales asignados no siempre están en uso constante por los usuarios primarios, dejando porciones del espectro significativamente subutilizadas. Para que los dispositivos de radio puedan aprovechar estos espacios libres en el espectro, deben adaptarse para ajustar dinámicamente sus parámetros de transmisión en función del conocimiento de las transmisiones de otros dispositivos a su alrededor.

Las técnicas de radio cognitiva permiten que las radios gestionen el acceso al espectro de manera dinámica, con el fin de mejorar la calidad de las transmisiones dentro de una red de comunicaciones. Una radio cognitiva puede detectar el estado del espectro y encontrar maneras de maximizar sus propias transmisiones utilizando varias métricas, que se analizarán a continuación. Tanto las técnicas de radio cognitiva como el acceso dinámico al espectro (DSA) pueden integrarse en redes inalámbricas para mejorar el rendimiento del espectro y maximizar la utilización del ancho de banda. Estas técnicas son especialmente útiles para las radios de usuarios secundarios (SU), que no tienen prioridad en el acceso al espectro, pero buscan transmitir cuando las radios de usuarios primarios (PU) están inactivas.

2.1.2.1 Sistema de Radio Cognitiva

Se describe como un sistema de radio capaz de ajustar de manera autónoma y dinámica sus parámetros de transmisión, en función de la interacción con su entorno, con el objetivo de maximizar la velocidad efectiva (throughput), minimizar interferencias, favorecer la interoperabilidad y tener acceso a mercados secundarios, dentro de esta tecnología se tienen dos características clave: la capacidad cognitiva, que implica la detección de variaciones en diversas dimensiones del electroespacio para identificar oportunidades de espectro, seleccionar la más óptima y compartirla con otros usuarios sin afectar al usuario primario; y la reconfigurabilidad, que se refiere a la capacidad del transceptor cognitivo para adaptar los parámetros de transmisión según características del canal seleccionado [15].

2.1.2.2 Ciclo Cognitivo

El ciclo cognitivo ilustrado en la figura 2 se refiere a las tareas realizadas por la radio cognitiva. Consta de varias etapas, entre las que se incluyen:

- **Detección de espectro**

Los dispositivos de radio cognitiva monitorean las bandas de espectro en su entorno para detectar a los usuarios con licencia que operan en esas frecuencias. También identifican áreas no ocupadas del espectro de radiofrecuencia, conocidas como espacios en blanco o huecos de espectro, los cuales aparecen y desaparecen de manera dinámica y pueden ser usados sin necesidad de tener licencia. La detección del espectro puede realizarse de manera cooperativa o no cooperativa. En la cooperativa, los dispositivos de radio cognitiva comparten información sobre el espectro entre ellos, mientras que en la no cooperativa cada dispositivo opera por su cuenta [16].

- **Decisión sobre el espectro**

La CR elige el mejor canal vacante para la comunicación del SU dado un análisis previo.

- **Movilidad del espectro**

La CR detecta un cambio en las condiciones del canal. O bien la calidad del canal se ha degradado, o bien ha aparecido el UP, y la CR debe cambiar su canal de operación a una vacante diferente del espectro.

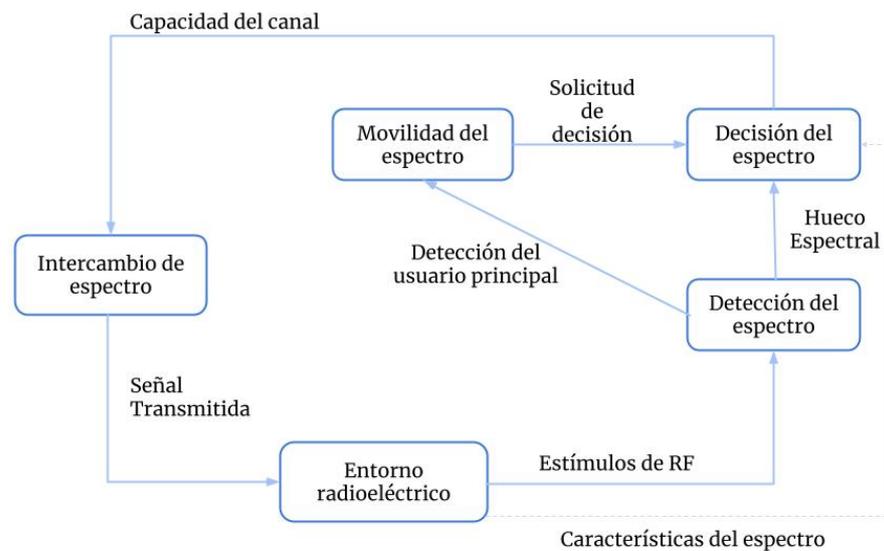


Figura 2. Ciclo cognitivo

- **Intercambio de espectro**

La CR se coordina con las transmisiones de otros usuarios de CR para evitar colisiones al acceder a la misma porción de espectro vacante.

La radio toma decisiones, generalmente a través de máquinas de estados finitos basándose en la información obtenida durante las etapas de detección y movilidad del ciclo.

2.1.2.3 Técnicas de detección del espectro

La detección del espectro tiene como propósito identificar las unidades de procesamiento, así como otras entidades relacionadas, mientras localiza áreas no ocupadas dentro del espectro. Para lograrlo, se emplean diversas técnicas para detectar señales presentes en el espectro, entre las cuales incluyen:

2.1.2.3.1 Detección de energía

La detección de energía es la técnica más simple para identificar señales, y consiste en comparar la magnitud de las muestras recibidas durante un escaneo con un nivel de ruido previamente conocido. Si las magnitudes superan el umbral establecido, se asume la presencia de una señal; de lo contrario, se considera que no hay señal. Este método parte del supuesto de que la CR conoce el nivel de ruido antes de realizar la detección. Sin embargo, incluso con una estimación inicial, el nivel de ruido real puede variar debido a factores relacionados con el canal, lo que podría llevar a errores en la evaluación del espectro y, en consecuencia, causar interferencias no deseadas.

2.1.2.3.2 Detección de filtro adaptado

La detección mediante filtros adaptados es una técnica alternativa que ofrece mayor robustez. Este método requiere información previa sobre la señal transmitida, como secuencias piloto, esquemas de modulación, códigos de expansión, preámbulos o formatos de paquetes. Este conocimiento es esencial, ya que la técnica correlaciona uno o más de estos patrones conocidos con la señal observada para determinar la presencia de transmisiones de usuarios primarios (UP). Por ejemplo, una radio de usuario secundario (US) podría intentar utilizar un canal asignado a una señal 5G NR y emplear filtros adaptados para correlacionar las señales de sincronización conocidas con la señal observada. Si se detecta una correlación, se asume la presencia de la señal 5G NR; en caso contrario, se considera que no está presente. A diferencia de la detección de energía, esta técnica no depende del conocimiento previo del nivel de ruido y puede ofrecer una detección más rápida y confiable.

2.1.2.3.3 Detección ciclo estacionaria

La detección ciclo estacionaria es otra técnica que aprovecha la periodicidad inherente a muchas señales transmitidas. Las señales de comunicación inalámbrica suelen contener elementos repetitivos, como códigos, ondas sinusoidales, prefijos cíclicos y secuencias de salto, lo que les otorga características ciclo estacionarias, es decir, ciertas propiedades estadísticas que varían de manera periódica. Los detectores ciclo estacionarios identifican estas señales al medir dichas estadísticas periódicas y compararlas con valores umbral predefinidos.

2.1.2.3.4 Detección basada en covarianza

Por último, la detección basada en covarianza se desarrolló como una alternativa para superar la dependencia del conocimiento previo sobre el nivel de ruido o los parámetros de la señal. Esta técnica se basa en las diferencias estadísticas entre las covarianzas del ruido y las señales, que suelen ser distintas. Utilizando matrices de covarianza, el método analiza estas diferencias estadísticas para determinar si un usuario primario (UP) está utilizando el canal, asumiendo que en ausencia de señal solo estará presente el ruido.

Las técnicas de detección presentadas aquí son algunas de las más utilizadas para identificar la actividad de los usuarios primarios (UP) en un canal. Estas van desde enfoques simples, como la detección de energía, hasta métodos más avanzados, como el uso de filtros

adaptados y la detección basada en covarianza, que requieren radios definidas por software (SDR) capaces de ejecutar algoritmos complejos. Además, estas técnicas deben ajustar sus parámetros según el tipo de señal a detectar, como patrones de sincronización o símbolos piloto, lo que hace necesaria una arquitectura reprogramable para procesar estos algoritmos de manera eficiente.

2.1.3 Problemas cognitivos comunes de la radio

En una red inalámbrica, las radios de los usuarios primarios (UP) suelen operar de forma independiente, sin cooperar con las radios de los usuarios secundarios (US). Un problema potencial surge cuando una radio cognitiva (CR) de un US no detecta correctamente la presencia de un transmisor UP, por ejemplo, si esta fuera de su rango de detección. Esto puede llevar a que el US transmita, generando interferencias en la red de UP. Este fenómeno se conoce como el problema de nodo oculto y puede volverse crítico si las radios US interfieren repetidamente con las de los UP.

Diversos factores, como el desvanecimiento severo por trayectos múltiples o el bloqueo por estructuras cercanas, pueden agravar el problema del nodo oculto. Una solución efectiva es la detección cooperativa del espectro, en la que dos o más radios US comparten el mismo canal y colaboran para detectar la actividad de los UP, intercambiando información entre sí. Este enfoque puede ampliarse a varios dispositivos, lo que mejora la confiabilidad de la detección de las transmisiones de los PU.

El problema del nodo oculto también se manifiesta en redes con condiciones de canal altamente inestables, donde las señales pueden desvanecerse de manera impredecible, lo que lleva a errores en la detección de los UP por parte de los US. Nuevamente, la detección cooperativa puede ser clave para mitigar estos inconvenientes.

La flexibilidad de las radios cognitivas es esencial para una gestión más eficiente del espectro mediante el acceso dinámico al espectro (DSA). Sin embargo, esta flexibilidad no es viable con radios tradicionales basadas en hardware. Para que una radio pueda detectar, analizar y ajustar dinámicamente sus parámetros, es necesario emplear arquitecturas más adaptables. Las radios definidas por software (SDR) son una solución ideal, ya que sus arquitecturas reconfigurables permiten modificar dinámicamente parámetros como la frecuencia operativa, el esquema de modulación, el número de antenas, el ancho de banda y la potencia de transmisión. Esto hace de las SDR una herramienta fundamental para implementar radios cognitivas.

2.1.4 Tipos de usuarios en una red de radio cognitiva

Los canales de acceso en una red de radio cognitiva son los medios por los cuales los dispositivos (llamados usuarios secundarios) pueden detectar y aprovechar las oportunidades de comunicación en el espectro radioeléctrico, sin interferir con los usuarios primarios.

- **Usuarios primarios (UP)**

Son aquellos que tienen licencia, por lo tanto, tienen prioridad y su transmisión no puede ser interrumpida [17].

- **Usuarios secundarios (US)**

Son los usuarios cognitivos que buscan oportunidades para transmitir en los canales que no están siendo usados por los usuarios primarios, los mismos deben ser capaces de detectar si un canal está libre antes de acceder a él y cerrar la transmisión cuando el usuario primario lo requiera [17].

Son importantes porque permiten el uso más eficiente del espectro radioeléctrico, evitando que las bandas queden desocupadas por largos períodos. Se adaptan a las condiciones cambiantes del entorno radioeléctrico, permitiendo a los usuarios secundarios encontrar mejores canales disponibles en cada momento y los mismos pueden aprovechar las oportunidades de comunicación lo que les permite acceder a servicios de alta calidad cuando están disponibles [17].

2.1.4.1 Acceso dinámico al espectro (DSA)

Los huecos de espectro son bandas de frecuencia asignadas para un uso específico pero que no son utilizadas de manera constante por los titulares de licencias en ciertos lugares o momentos. La eficiencia en el uso del espectro puede mejorarse al identificar estas porciones vacantes y permitir que otros usuarios las aprovechen, incluso para servicios diferentes a los asignados originalmente a la banda.

En esta sección, se presenta una descripción general de los avances hacia la regulación para la gestión dinámica del espectro. La figura 3 ilustra el concepto de acceso dinámico al espectro. En este contexto, el usuario con licencia a largo plazo para una frecuencia específica es denominado UP, mientras que el usuario que aprovecha las oportunidades del espectro vacante es llamado usuario secundarios US.

Por ejemplo, en el periodo 2T, el US1 puede ocupar cualquier parte del espectro disponible, como la banda 2 o la banda 3. Sin embargo, en el periodo 3T, si el UP2, quien tiene asignada la banda 2, comienza a transmitir, el US1 debe desplazarse al espacio vacante en la banda 3 para evitar interferencias

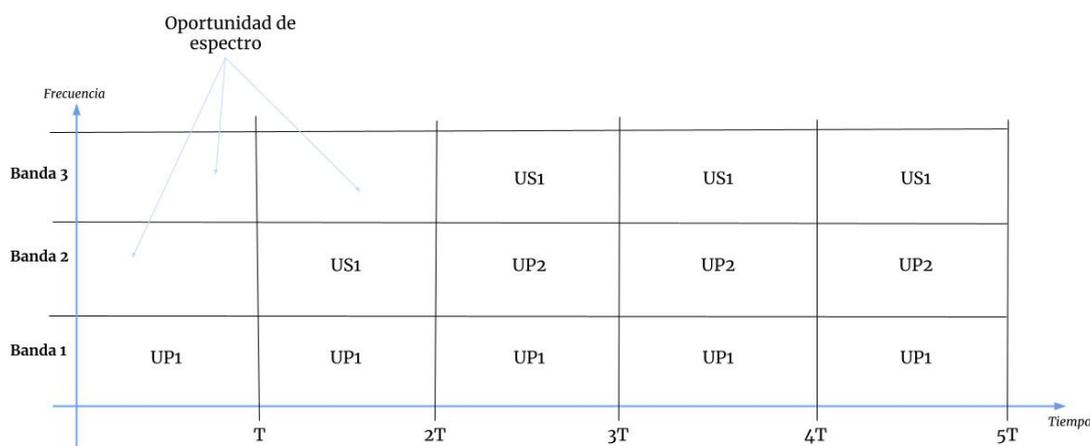


Figura 3. Ilustración del acceso dinámico al espectro entre usuarios primarios y secundarios.

Los espacios en blanco y espacios en gris se han utilizado para clasificar el estado de ocupación del espectro. El espacio blanco se refiere a las bandas de espectro que no están en uso en un lugar específico, mientras que el espacio gris describe el espectro que se utiliza solo de manera intermitente. Por ejemplo, esto puede ocurrir con radios que solo transmiten cuando hay datos o señales de control que enviar, lo que resulta en un uso no continuo del espectro asignado. Además, un área puede considerarse espacio gris si se trata de un punto ciego para el transmisor al que se asignó esa frecuencia.

Aunque el uso compartido del espectro puede mejorar su eficiencia, esta mejora puede maximizarse aún más si las radios tienen la capacidad de acceder al espectro de manera dinámica, adaptándose a las variaciones de demanda en tiempo y espacio. Esto es posible mediante una combinación de técnicas avanzadas, que incluyen capacidades adicionales como el análisis del espectro en tiempo real y el uso de modulación con agilidad de frecuencia.

2.1.5 Modelo de Márkov

Un modelo de Márkov es un modelo estocástico que describe una secuencia de eventos donde la probabilidad de que ocurra un evento futuro depende solo del estado actual en lugar de los estados anteriores. La estructura fundamental de un modelo de Márkov se compone del conjunto de estados posibles y las posibilidades de transición entre estos estados [18].

2.1.5.1 Componentes de un modelo de Márkov

- **Espacio de estados (S)**

Conjunto de todos los posibles valores estados que puede tomar el sistema. Puede ser:

Finito: $S = \{ S_1, S_2, \dots, S_n \}$

Infinito: $S = \{0, 1, 2, \dots\}$

- **Matriz de transición (P)**

Define las probabilidades de moverse de un estado a otro en un solo paso. Para una cadena con espacio de estados finito $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, la matriz de transición es una matriz $n \times n$ donde:

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

Y satisface $\sum_{j \in S} P_{ij} = 1$

- **Distribución inicial (π)**

Es un vector que especifica la probabilidad de que el sistema comience en cada estado:

$$\pi = [P(X_0 = S_1), P(X_0 = S_2), \dots, P(X_0 = S_n)].$$

2.1.5.2 Propiedades de un modelo de Márkov

- **Irreducibilidad**

Una cadena de Márkov es irreducible si es posible llegar a cualquier estado desde cualquier otro estado, aunque no necesariamente en un único paso.

- **Periodicidad**

Un estado S_i tiene periodo d si todas las transiciones que regresan a S_i ocurren en múltiplos d . Una cadena es aperiódica si $d = 1$ para todos los estados.

- **Estados recurrentes y transitorios**

Un estado S_i es recurrente si, al comenzar en S_i , la probabilidad de regresar a S_i es 1.

Es transitorio si existe una probabilidad positiva de no regresar nunca a S_i .

- **Distribución estacionaria (π)**

Una distribución estacionaria es un vector π tal que:

$$\pi P = \pi$$

Representa el estado a largo plazo de la cadena, independiente de la distribución inicial.

- **Ergodicidad**

Una cadena de Márkov es ergódica si es irreducible, aperiódica y tiene una distribución estacionaria única.

2.1.6 Calidad de servicio en términos de probabilidad de bloqueo

Calidad de servicio se refiere a la medida de eficiencia y confiabilidad con la que se entregan los servicios de red a los usuarios. La probabilidad de bloqueo es una métrica específica que se utiliza para evaluar la calidad de servicio en ciertos tipos de redes, como las de telecomunicaciones. La probabilidad de bloqueo se refiere a la posibilidad de que una solicitud de servicio sea rechazada o bloqueada debido a la falta de recursos disponibles en la red [19].

2.1.7 Estado del arte

La radio cognitiva tiene un papel importante dentro de las redes inalámbricas, por lo que a continuación se describen algunos trabajos investigativos en diferentes campos.

Rodríguez García et al., en [20] analizan un algoritmo diseñado para seleccionar oportunidades espectrales en redes inalámbricas cognitivas. Estas redes permiten la mejora del uso del espectro al identificar bandas libres para su uso temporal. El algoritmo evaluado busca mejorar la eficiencia y el aprovechamiento del espectro disponible, reduciendo las interferencias con los usuarios primarios. Se detalla el proceso de implementación del algoritmo y se evalúa su desempeño en diversos escenarios, mostrando una mejora en la selección de oportunidades espectrales.

Por otra parte, Hernández et al., en [21] analizan el uso creciente de redes inalámbricas y la problemática de la escasez de espectro disponible debido al incremento en la demanda tecnológica. Propone el acceso dinámico al espectro y la radio cognitiva (CR) como soluciones innovadoras, destacando el proceso de “handoff espectral” en redes CR, que mejora el uso del espectro sin interferencias. Además, el artículo compara dos algoritmos multicriterio, Topsis y Vikor, evaluando su rendimiento en redes descentralizadas bajo diferentes condiciones de tráfico y colaboración entre usuarios secundarios.

Por último, Vega León y Andrea Guamo [22], abordan la escasez del espectro de radiofrecuencia y propone la tecnología de radio cognitiva como una solución innovadora para mejorar su utilización. Se centra en proporcionar una base teórica y práctica para la implementación de un enlace de comunicación basado en radio cognitiva, haciendo referencia al estándar IEEE 802.22 y menciona los principales bloques operativos del sistema de radio cognitivo, que son la detección y decisión del espectro, así mismo resalta la flexibilidad ofrecida por la radio definida por software (SDR) en el diseño y prueba práctica de sistemas de comunicación.

CAPÍTULO III

3.1 Metodología de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

La metodología de este proyecto se basa en una investigación exploratoria, la cual se realizará mediante un modelo de simulación por eventos discretos de una red de radio cognitiva basada en un modelo de Márkov. Se analizarán diferentes parámetros de comunicación para minimizar la probabilidad de bloqueo y proporcionar comunicaciones fiables. Con esto se pretende identificar e introducirnos en los conceptos de configuración espectral a través de las tecnologías cognitivas en radiocomunicaciones, adecuando los parámetros de la red para garantizar la disponibilidad de esta.

3.1.2 Métodos y técnicas de recolección de datos

3.1.2.1 Método analítico

Se utilizará un método analítico utilizando Márkov y se emplearán herramientas que revelan relaciones esenciales y características fundamentales de las variables objeto estudio. Con este método se puede obtener datos, como de los errores aprendiendo de ellos.

3.1.2.2 Modelo de simulación

Se desarrolló un modelo de simulación utilizando MATLAB que consiste en implementar ecuaciones que representan procesos, variables y relaciones entre variables de fenómenos del mundo real y que brindan indicaciones aproximadas de su comportamiento bajo. Se formalizará en un modelo de simulación la percepción del fenómeno real de la red.

Como se ilustra en la figura 4, se modela el tráfico de UP y US a nivel de conexión, se ignora las interacciones a nivel de paquete (programación, gestión de búfer, etc.). Se supone una capa de control de acceso al medio (Medium Access Control, MAC) ideal para los US, que permite compartir perfectamente los canales asignados entre los US activos (todos los US activos obtienen la misma porción de ancho de banda), hay cero retardos y cuyos mecanismos de control consumen cero recursos. Además, se asume que un US activo puede detectar la llegada de un UP al mismo canal de forma instantánea y confiable. En este sentido, los parámetros de rendimiento obtenidos pueden considerarse como un límite superior.

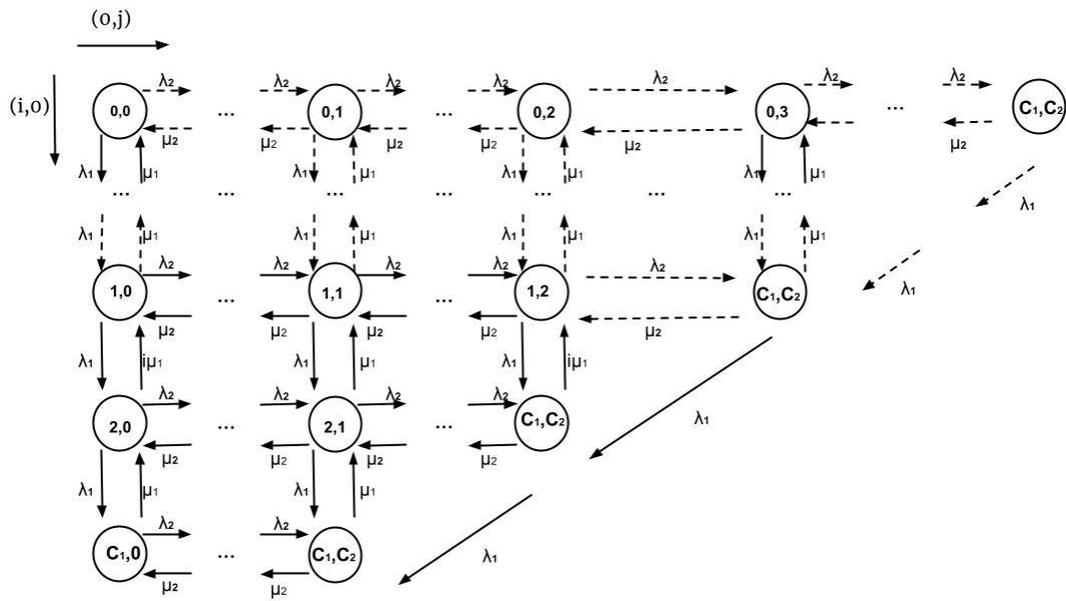


Figura 4. Sistema de Radio Cognitiva.

El sistema de radio cognitiva tiene C_1 canales primarios (CP) que pueden ser compartidos por UP y US, y C_2 canales secundarios (CS) solo para usuarios secundarios. Entonces $C=C_1+C_2$ indica el número total de canales en el sistema, se debe tener en cuenta que los CS se pueden obtener en bandas sin licencia.

Alternativamente, como podría ser de interés comercial para las redes primarias y secundarias cooperar, los canales secundarios podrán obtenerse en base a un acuerdo con la red primaria. Un US en los CP podría verse obligado a abandonar su canal si un UP le solicita que inicie una nueva sesión. Dado que los usuarios secundarios admiten el traspaso del espectro, un US desocupado puede continuar con su comunicación en cursos si hay un canal libre disponible, caso contrario se ve obligado a interrumpirla.

En aras (programa libre para automatización de emisoras de radio) de manejabilidad matemática, se suponen llegadas de Poisson y tiempos de servicio distribuidos exponencialmente. La tasa de llegada a las sesiones de UP y US es, λ_1 y λ_2 , su tasa de servicio es μ_1 y μ_2 , y las solicitudes consumen 1 canal cuando se aceptan. Se denota por (i, j) el estado del sistema, cuando hay sesiones de i UP y j US en curso. El conjunto de estados factibles es $S := \{(i, j) : 0 \leq i \leq C_1, 0 \leq i + j \leq C\}$ y la cardinalidad es $|S| = \binom{C_1 + C_2 + 1}{2} \cdot (C_1 + 1)$.

El diagrama de transición de estado se muestra en la figura 5. Dado el conjunto de estados factibles y sus transiciones en un CTMC, se puede construir las ecuaciones de equilibrio global y la ecuación de normalización. A partir de esto, calculamos las probabilidades de estado estacionario denotadas como $\pi(i, j)$

3.1.2.2.1 Operación de usuarios en escala de tiempo

Se considera que la dinámica de los tipos de usuarios opera en escalas de tiempo suficientemente separadas, lo que permite recurrir a métodos de aproximación altamente eficientes basados en la descomposición de escalas de tiempo, que pueden simplificar enormemente los cálculos.

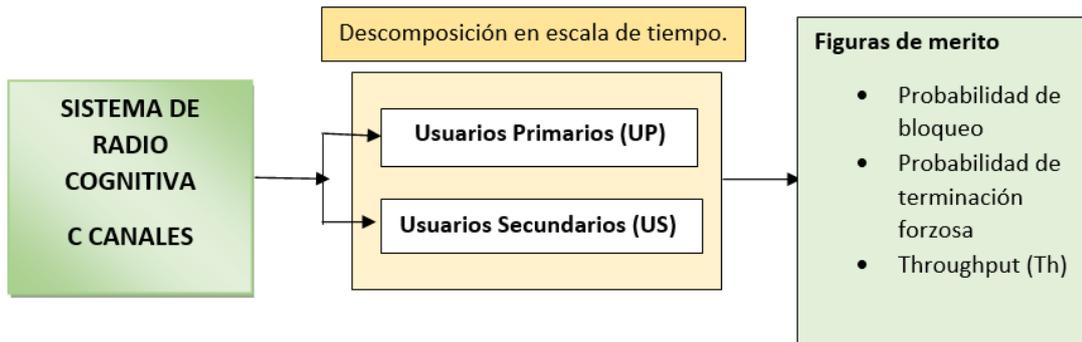


Figura 5. Descomposición en escala de tiempo.

En la figura 6 vemos el diagrama de transición de estado para un sistema de radio cognitiva lo denotamos por (i, j) el estado del sistema cuando hay i sesiones del UP en curso y j cuando hay sesiones en US. El conjunto de estados factibles es

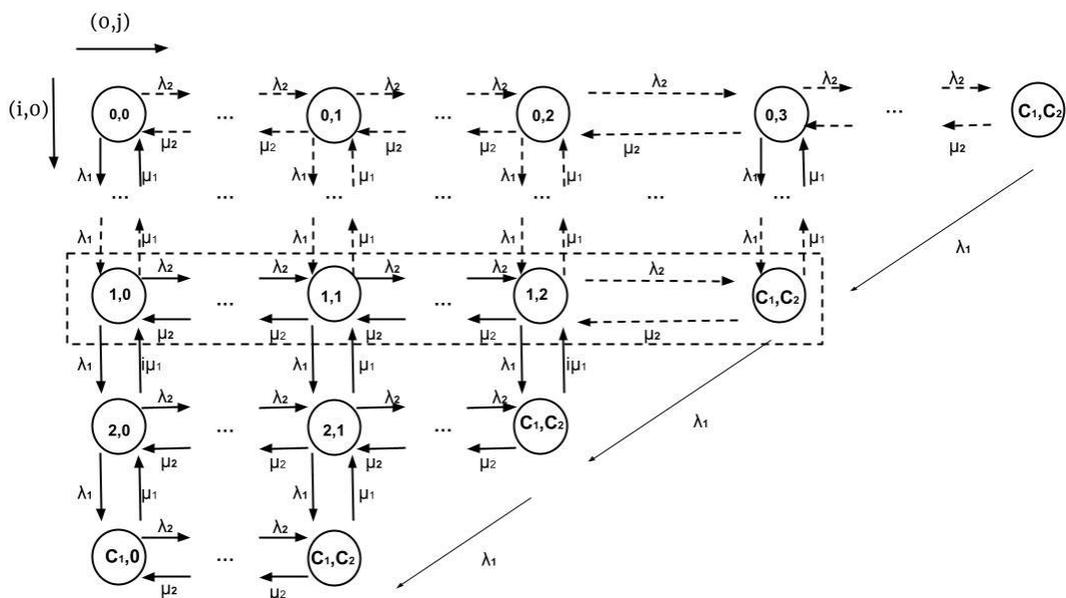


Figura 6. Diagrama de transición de estado. Sistema de radio cognitiva.

Dado que la dinámica de diferentes tipos de usuarios opera en escalas de tiempo suficientemente separadas, se considera que: cuando el sistema alcanza un estado en cualquier fila i , el sistema permanecerá en esa fila durante mucho tiempo.

En la figura 7 se representa todas las posibles transiciones del estado (i, j) que se muestra en la figura 8. Considerando la descomposición en la escala de tiempo, las transiciones $d_{i,j}$ y $u_{i,j}$ en la figura 7 lleva el sistema a otros estados ubicados en otras filas, por lo tanto, el sistema permanecerá en cualquiera de esas filas durante mucho tiempo, por esa razón estas transiciones llevan al sistema hacia un estado de absorción. Este comportamiento se representa en la cadena de Márkov correspondiente a una fila i en la figura 8.

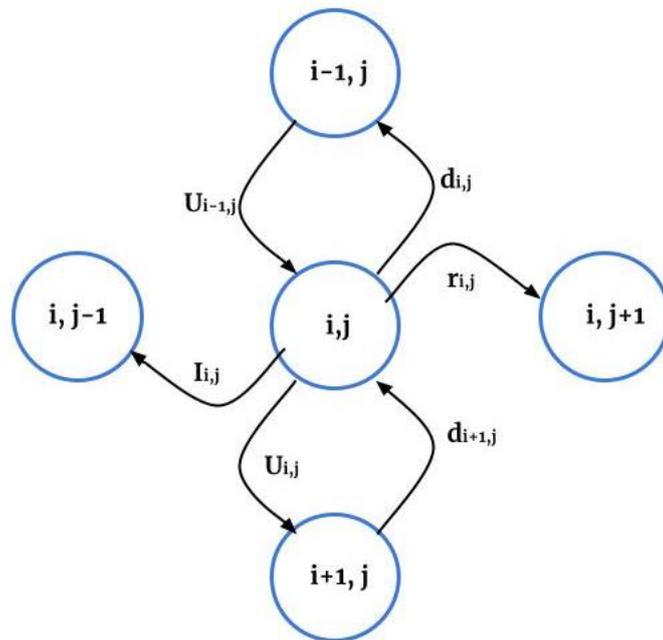


Figura 7. Estado (i, j) .

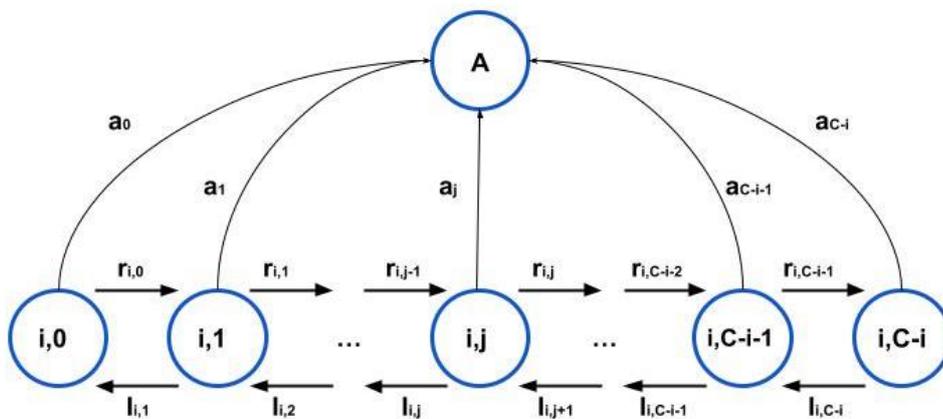


Figura 8. Estado de absorción.

3.1.2.2.1 Parámetros de rendimiento

Los parámetros de rendimiento del sistema se determinan de la siguiente manera:

Probabilidad de bloqueo

$$P_{UP} = \sum_{k=0}^{C_2} \pi(C_1, k)$$

$$P_{US} = \sum_{k=C_2}^C \pi(C - k, k)$$

Probabilidad de terminación forzosa

$$P_{ft} = \frac{\lambda_1(P_{US} - \pi(C_1, C_2))}{\lambda_2(1 - P_{US})}$$

Throughput

$$Th_{US} = \sum_{j=1}^C \sum_{i=0}^Z j U_2 \cdot \pi(i, j)$$

3.1.3 Población y muestra

Para el presente proyecto, la población se define mediante un modelo de tráfico donde se considera diferentes tipos de bloqueo. El modelo de tráfico está definido por un proceso de Poisson con una determinada tasa que varía de 0 a 200 peticiones por unidad de tiempo. Esta tasa se utiliza en el modelo de simulación para obtener los datos de rendimiento del sistema en términos de probabilidad de bloqueo en diferentes escenarios variando el número de canales disponibles para usuarios primarios y secundarios. Se analizan los datos de toda la población por lo que no se calcula una muestra.

CAPÍTULO IV

4.1 Resultados

4.1.1 Análisis de tasa de llegada

Se ejecutaron varias simulaciones en MATLAB en donde se analizó el comportamiento de un sistema de radio cognitiva relacionado con la transmisión de datos que incluye usuarios primarios (UP) y usuarios secundarios (US) se calcularon las diferentes métricas de rendimiento como son: la probabilidad de bloqueo de usuarios primarios y secundarios, el rendimiento para usuarios secundarios y la tasa de terminación forzada para usuarios secundarios, en donde se involucran tasas de llegada (λ_1 , λ_2) independientes para UP y US, respectivamente.

En la figura 9 se muestra la probabilidad de bloqueo de los usuarios primarios (UP) en función de λ_1 , que es la tasa de llegada de solicitudes de estos. Cada curva representa una relación diferente entre la tasa de llegada de los usuarios secundarios (λ_2) y λ_1 .

En el eje X se representa la tasa de llegada de los usuarios primarios, con valores entre 10 y 200. Es decir, como varía la probabilidad de bloqueo a medida que los usuarios primarios generan más solicitudes, mientras que en el eje Y se representa la probabilidad de que un usuario primario sea bloqueado debido a la falta de recursos en el sistema.

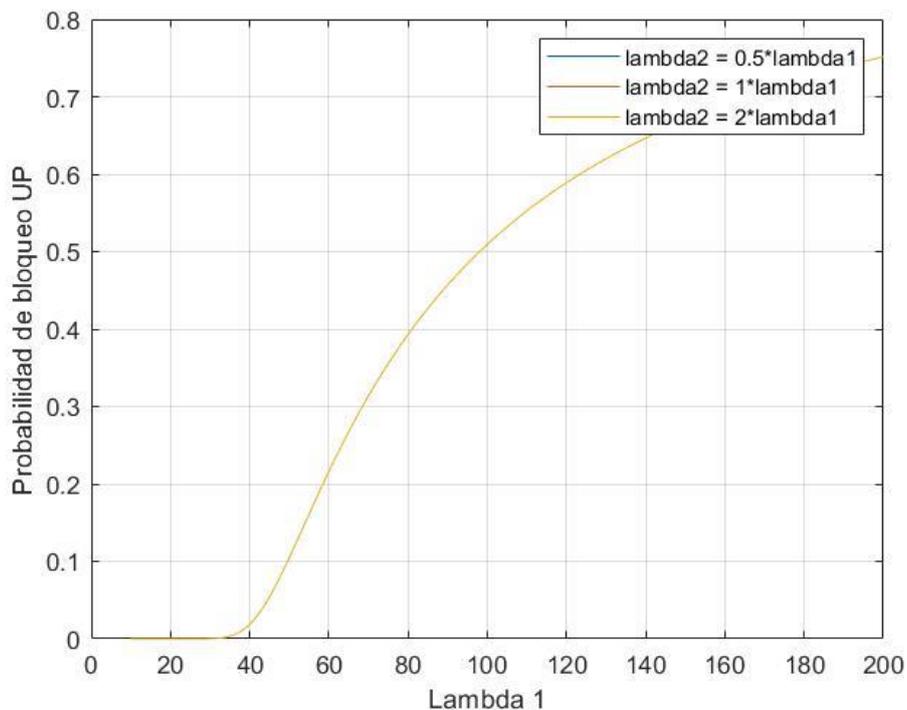


Figura 9. Curvas resultantes de la probabilidad de bloqueo de usuarios primarios (UP) con valores entre 10 y 200 de tasa de llegada.

En la figura 10 se muestra como varía la probabilidad de bloqueo para los usuarios secundarios (US) en función de la tasa de llegada de solicitudes de los usuarios primarios (λ_1). Cada curva corresponde a una relación diferente entre la tasa de llegada de los usuarios secundarios (λ_2) y λ_1 . Se debe mencionar que todas las curvas muestran un incremento en la probabilidad de bloqueo conforme λ_1 aumenta, lo que es razonable ya que una mayor cantidad de solicitudes de usuarios primarios (UP) provoca mayor saturación en el sistema, dejando menos recursos disponibles para los usuarios secundarios (US), según las siguientes proporciones:

- $\lambda_2 = (0.5 * \lambda_1)$

Cuando λ_2 es bajo en comparación con λ_1 , la probabilidad de bloqueo para los usuarios secundarios es la más baja entre las tres proporciones esto se debe a que haya menos solicitudes de usuarios secundarios compitiendo por los recursos del sistema.

- $\lambda_2 = \lambda_1$

Cuando λ_2 es igual a λ_1 la probabilidad de bloqueo aumenta de manera significativa. La relación 1:1 entre las tasas de llegada de usuarios secundarios y primarios genera una competencia equilibrada pero intensa por los recursos.

- $\lambda_2 = (2 * \lambda_1)$

Cuando λ_2 es el doble de λ_1 , la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios es la más alta. Esto ocurre porque los usuarios secundarios generan muchas más solicitudes, lo que satura el sistema rápidamente, especialmente cuando λ_1 también es alto

En el eje X se representa la tasa de llegada de solicitudes de usuarios primarios, que varía entre 10 y 200, mientras que en el eje Y se representa la probabilidad de que un usuario secundario sea bloqueado debido a la falta de recursos.

Por otro lado, las curvas se separan más a medida que λ_1 aumenta, lo que indica que el impacto de λ_2 se hace más evidente en situaciones de alta carga, cuando λ_1 es bajo (<50), las tres proporciones tienen un comportamiento similar, ya que el sistema no está saturado y puede manejar tanto las solicitudes de UP como de US de manera eficiente, mientras que para las proporciones mayores de $\lambda_2 = 0.5 * \lambda_1$ y $\lambda_2 = \lambda_1$ la probabilidad de bloqueo alcanza valores altos (>0.8) antes de llegar a $\lambda_1 = 200$. Esto muestra que el sistema entra en saturación cuando los usuarios secundarios generan más solicitudes.

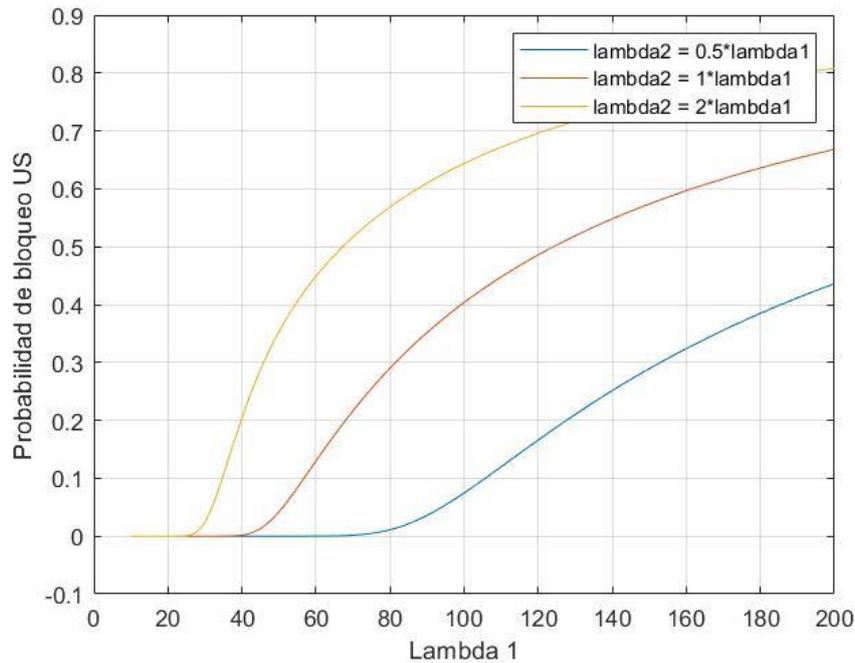


Figura 10. Curvas resultantes de la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 200 de tasa de llegada.

En la figura 11 se analizó el throughput de los usuarios secundarios US en un sistema donde tanto los usuarios primarios UP como los secundarios US compiten por los recursos disponibles. El throughput es una métrica clave que mide cuantas solicitudes de usuarios secundarios se procesan exitosamente por unidad de tiempo, la misma que se analiza en función de lambda1 que es la tasa de llegada de solicitudes de usuarios primarios (UP), que se incrementa de 10 a 200 y lambda2 que es la tasa de llegada de solicitudes de usuarios secundarios, que esta escalada proporcionalmente con lambda1 según las siguientes proporciones:

- $\text{Lambda2} = 0.5 * \text{lambda1}$

Para esta proporción, el throughput crece constantemente con lambda1, sin alcanzar un punto máximo visible en el rango analizado. Esto se debe a que el número de solicitudes de US es bajo en relación con las de UP, y el sistema no experimenta alta saturación desde los usuarios secundarios.

- $\text{Lambda2} = \text{lambda1}$

En este caso, el throughput alcanza un máximo alrededor de lambda1 entre 40-60 y luego comienza a estabilizarse. Esto ocurre porque, conforme aumenta lambda1, los recursos del sistema comienzan a ser ocupados por los UP, limitando el servicio para los usuarios secundarios.

- $\lambda_2 = 2 * \lambda_1$

Aquí el throughput de los US alcanza un pico aún más alto alrededor de λ_1 entre 20-40, y después comienza a disminuir lentamente. Esto se debe a que, con una alta tasa de solicitudes de US, el sistema se satura rápidamente, y el rendimiento por usuario empieza a disminuir

En el eje X (λ_1) se representa la tasa de llegada de solicitudes de usuarios primarios, variando de 10 a 200, mientras que en el eje Y (Throughput US) se representa el rendimiento de los usuarios secundarios, medido en términos de solicitudes completadas por unidad de tiempo. Por otro lado, el throughput de los usuarios secundarios varía en función de λ_1 y de la proporción λ_2/λ_1 , en todas las curvas hay una región inicial donde throughput incrementa con λ_1 . Sin embargo, cuando el rendimiento disminuye o se estabiliza debido a la saturación del sistema.

En las curvas roja y amarilla, se observa un pico claro en el throughput, que representa el punto donde el sistema puede manejar eficientemente tanto las solicitudes de US como de UP. Sin embargo, después de este pico el throughput se estabiliza o disminuye, ya que los recursos del sistema son asignados a los UP ya que son los que tienen prioridad, entonces para los valores bajos de λ_1 (>100), todas las curvas tienden a un comportamiento similar, con throughput estabilizado, porque el sistema prioriza atender a los usuarios primarios, limitando las oportunidades de servicio para los secundarios.

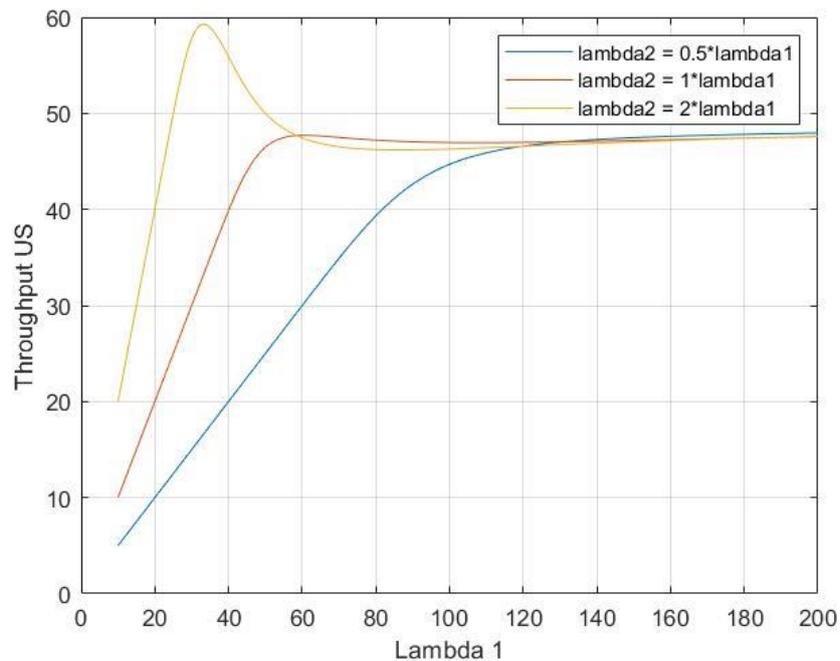


Figura 11. Curvas resultantes del análisis de Throughput de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 200 de tasa de llegada.

En la figura 12 se analizó la probabilidad de terminación forzosa de solicitudes de usuarios secundarios (US) en función de la tasa de llegada de solicitudes de usuarios primarios (λ_1), con diferentes proporciones entre las tasas de llegada de solicitudes de usuarios secundarios (λ_2) y λ_1 , según las siguientes proporciones:

- $\lambda_2 = 0.5 \cdot \lambda_1$

Para esta proporción la probabilidad de terminación forzosa es muy baja (prácticamente cercana a 0), esto se debe a que la tasa de llegada de US es baja y no hay mucha competencia por los recursos.

- $\lambda_2 = \lambda_1$

En este caso la probabilidad de terminación forzosa comienza a aumentar de manera más pronunciada, esto refleja que el sistema está alcanzando su límite y que los usuarios secundarios (US) pierden acceso a los recursos cuando los usuarios primarios (UP) tienen prioridad.

- $\lambda_2 = 2 \cdot \lambda_1$

Aquí la probabilidad de terminación forzosa es significativamente mayor en esta región, alcanzando aproximadamente 0.35 en λ_1 , esto se debe a que la alta carga de solicitudes de usuarios secundarios genera más colisiones y desplazamiento de los mismos

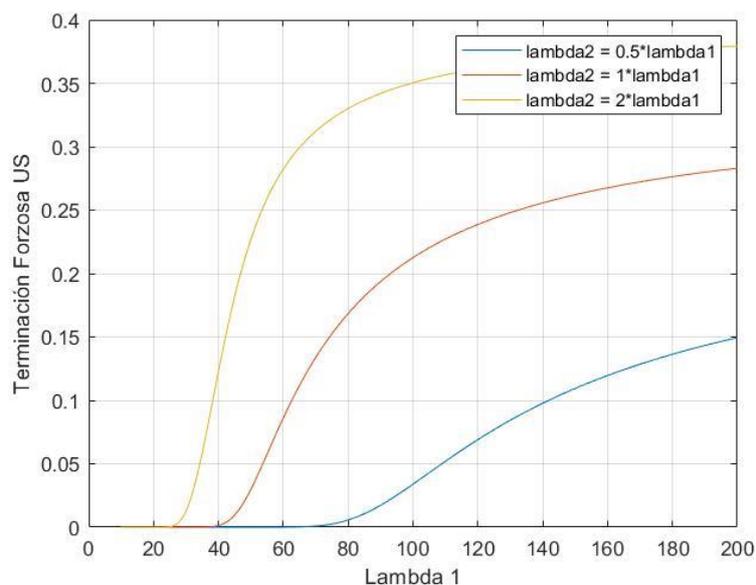


Figura 12. Curvas resultantes del análisis de Terminación Forzosa de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 200 de tasa de llegada.

En el eje X (λ_1) se representa la tasa de llegada de solicitudes de usuarios primarios (UP) que varía entre 10 y 200, mientras que en el eje Y (Terminación forzada de US) se representa la probabilidad de terminación forzada de las solicitudes de usuarios secundarios (US), en donde una terminación forzada ocurre cuando un US pierde su acceso al sistema debido a que un usuario primario (UP), que tiene mayor prioridad, requiere recursos.

En la curva azul, la probabilidad de terminación forzosa es cercana a 0, ya que tanto los usuarios primarios (UP) como los usuarios secundarios (US) tienen pocas solicitudes y el sistema no está saturado, mientras que en la curva roja la probabilidad empieza a incrementarse ligeramente debido a que los usuarios secundarios (US) compiten más con los usuarios primarios (UP) al ser su tasa de llegada similar, y en la curva amarilla se observa un aumento significativo de la probabilidad de terminación forzada incluso a valores bajos de λ_1 , ya que hay una gran cantidad de solicitudes de US que compiten con los UP.

Se ejecutaron varias simulaciones en MATLAB en donde se analizó el comportamiento de un sistema de comunicaciones basado en canales, considerando diferentes proporciones de asignación de recursos entre usuarios primarios (UP) y usuarios secundarios (US).

En la figura 13 se analizó la probabilidad de bloqueo para usuarios primarios (UP) en función del número total de canales disponibles (C), para diferentes proporciones de asignación de canales al grupo C_1 (usuarios primarios).

En el eje X se representa el número total de canales disponibles (C) en el sistema, que varía entre 10 y 100, mientras que en el eje Y se muestra la probabilidad de bloqueo para los usuarios primarios entre un valor de 0 y 1.

De manera general se puede comentar que la probabilidad de bloqueo para usuarios primarios disminuye conforme aumenta el número total de canales disponibles (C). Esto es intuitivo, ya que un mayor número de canales reduce la congestión en el sistema, según las siguientes proporciones

- Proporción baja $C_1 = 0.1$

Para esta proporción solo el 10% de los canales se asignan a usuarios primarios es muy alta (cercana a 1) al principio y desciende lentamente. Esto ocurre porque los usuarios primarios tienen pocos recursos, lo que aumenta su probabilidad de bloqueo.

- Proporción media $C_1 = 0.5$

En esta proporción se tiene una asignación más equilibrada (50% de los canales), la probabilidad de bloqueo es más baja que en el caso anterior. El descenso es más rápido, alcanzando valores cercanos a 0 cuando C supera los 50 canales.

- Proporción baja $C_1 = 0.9$

En este caso, el 90% de los canales se asignan a los usuarios primarios, lo que resulta en una probabilidad de bloqueo muy baja incluso para valores pequeños de C . Esto sugiere que los usuarios primarios tienen un acceso casi garantizado a los recursos

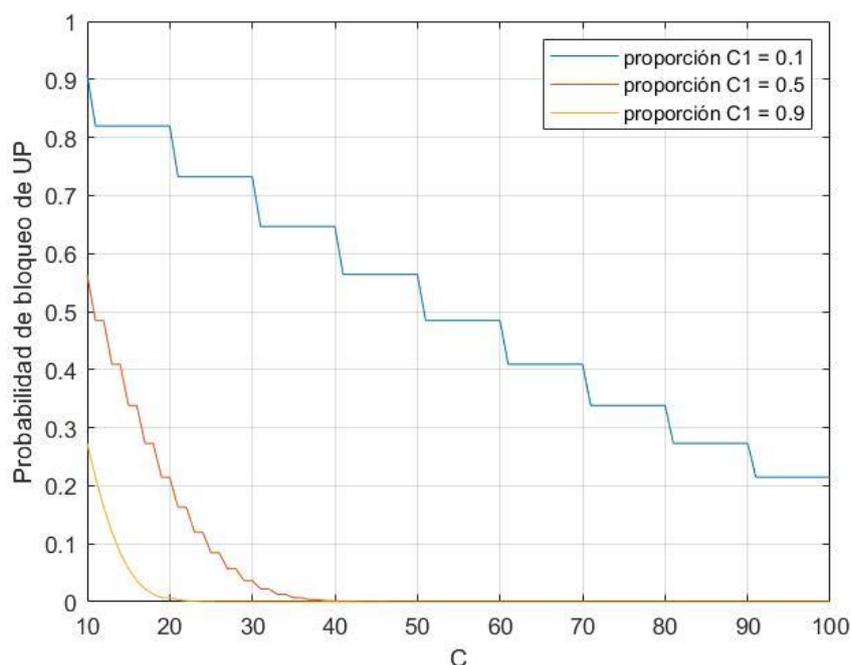


Figura 13. Curvas resultantes del análisis de la probabilidad de bloqueo de usuarios primarios (UP) con valores entre 10 y 100 canales.

En la figura 14 se analizó la probabilidad de bloqueo para usuarios secundarios (US) en función del número total de canales disponibles C , para diferentes proporciones de asignación de canales al grupo C_1 (usuarios primarios).

En el eje X se representa el número total de canales disponibles (C), variando entre 10 y 100, mientras que en el eje Y se muestra la probabilidad de bloqueo para los usuarios secundarios con valores entre 0 y 0.6.

De manera general la probabilidad de bloqueo para los usuarios secundarios decrece a medida que aumenta el número total de canales (C), para valores bajos de C es significativa (hasta 0.5 en algunos casos), pero conforme C aumenta, las curvas convergen hacia 0. Esto indica que, con suficientes recursos, los usuarios secundarios tienen menor probabilidad de ser bloqueados, según las siguientes proporciones.

- Proporción baja $C_1 = 0.1$

Para esta proporción solo el 10% de los canales se asignan a usuarios primarios, la probabilidad de bloqueo de los secundarios es muy baja desde el principio. Esto ocurre porque el 90% de los canales (C_2) están disponibles para ellos, asegurando que puedan acceder a los recursos.

- Proporción media $C_1 = 0.5$

En esta proporción se tiene una asignación más equilibrada (50% de los canales para usuarios primarios y secundarios), la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios comienza más alta que en el caso anterior, pero disminuye rápidamente conforme se incrementa C .

- Proporción baja $C_1 = 0.9$

En este caso, los usuarios secundarios reciben solo el 10% de los canales ($C_2 = 0.1 * C$). Esto resulta en una probabilidad de bloqueo más alta para ellos, especialmente para valores pequeños de C . Sin embargo, la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios disminuye a medida que C aumenta.

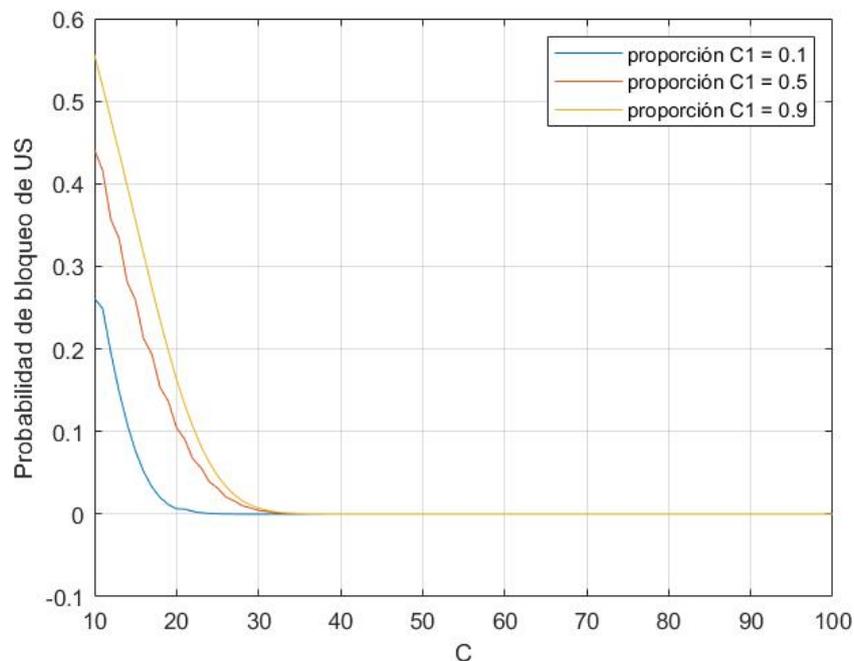


Figura 14. Curvas resultantes del análisis de la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 100 canales.

En la figura 15 se analizó el rendimiento de los usuarios secundarios (Throughput US) en función del número total de canales disponibles C , para distintas proporciones de asignación de canales al grupo C_1 (usuarios primarios).

En el eje X se representa el número total de canales disponibles (C), que varía entre 10 y 100, mientras que en el eje Y indica el rendimiento de los usuarios secundarios, medido en una unidad arbitraria (tasa de datos).

De manera general el rendimiento de los usuarios secundarios aumenta conforme crece el número total de canales disponibles (C) y para los valores altos de C , el throughput se estabiliza, alcanzando un valor límite en todos los casos aproximadamente a 10. Esto ocurre porque el sistema llega a un punto donde hay suficientes recursos para satisfacer las demandas de los usuarios secundarios, según las siguientes proporciones:

- Proporción baja $C_1 = 0.1$

Para esta proporción, cuando el 10% de los canales se asignan a usuarios primarios, los usuarios secundarios reciben la mayoría de los recursos $C_2 = 0.9 * C$. Esto se refleja en un crecimiento rápido del rendimiento, alcanzando su valor máximo (~ 10) mucho antes que las demás curvas (alrededor de $C = 20$).

- Proporción media $C_1 = 0.5$

En esta proporción la asignación equitativa entre usuarios primarios y secundarios $C_1 = C_2 = 0.5 * C$ genera un crecimiento moderado del rendimiento. La curva alcanza el valor máximo de throughput más tarde que el caso anterior (alrededor de $C = 50$).

- Proporción baja $C_1 = 0.9$

En este caso, con el 90% de los canales asignados a usuarios primarios, los usuarios secundarios reciben muy pocos recursos ($C_2 = 0.1 * C$). Esto retrasa considerablemente el crecimiento del throughput, que no se estabiliza hasta $C > 70$.

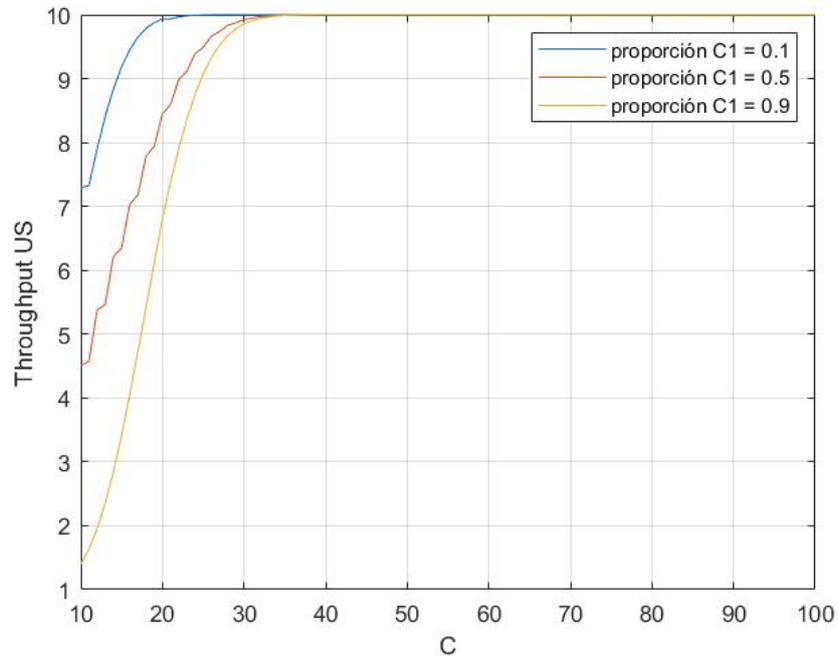


Figura 15. Curvas resultantes del análisis de Throughput de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 100 canales.

En la figura 16 se analizó la relación entre la probabilidad de terminación forzosa para los usuarios secundarios (US) y la capacidad del sistema C , bajo distintas proporciones del recurso C_1 , donde C_1 representa la parte del recurso asignada para usuarios secundarios.

En el eje X se representa la capacidad total del sistema, que puede interpretarse como el número máximo de recursos (canales, espectro) disponibles en el sistema, a medida que C aumenta, el sistema puede manejar más usuarios primarios y secundarios, mientras que en el eje Y se muestra la probabilidad de terminación forzosa para los usuarios secundarios, la misma es una métrica clave en redes compartidas donde los usuarios secundarios dependen de la disponibilidad de recursos no utilizados por los usuarios primarios, según las siguientes proporciones:

- Proporción baja $C_1 = 0.1$

Para esta proporción, solo el 10% de los recursos del sistema están dedicados a los usuarios secundarios (US), muestra una probabilidad de terminación forzosa muy baja incluso con capacidades pequeñas, pero disminuye lentamente a medida que C aumenta.

- Proporción media $C_1 = 0.5$

En esta proporción la asignación equitativa entre usuarios primarios y secundarios, presenta un descenso más pronunciado de la probabilidad de terminación forzada conforme C aumenta.

- Proporción baja $C_1 = 0.9$

En este caso, con el 90% de los canales asignados a usuarios secundarios, en donde la probabilidad de terminación forzada es mucho mayor debido al alto nivel de uso de recursos por parte de los usuarios secundarios (US). Sin embargo, conforme aumenta C , esta probabilidad desciende rápidamente.

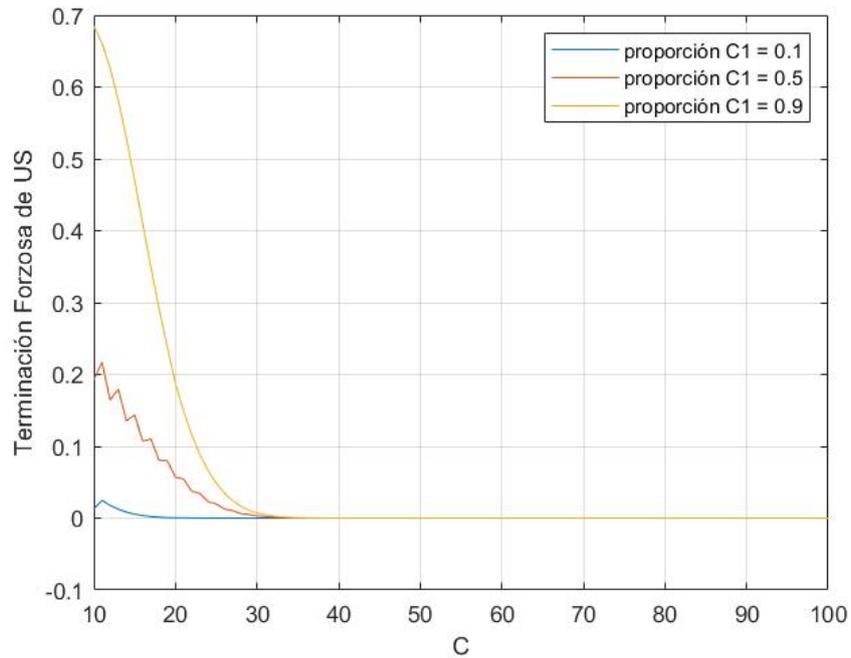


Figura 16. Curvas resultantes del análisis de Terminación Forzada de usuarios secundarios (US) con valores entre 10 y 100 canales.

Análisis del costo computacional

La figura 17 muestra la relación entre el número de canales y el costo computacional en términos del número de ecuaciones de una matriz Q del modelo de Márkov para obtener las probabilidades de estado.

El eje X representa el número de canales, que va desde 10 hasta 50 en este tipo de sistema de comunicación en el cual el número de canales influyó de una manera compleja para sus cálculos, mientras que en el eje Y se representa el costo computacional medido en términos del número de ecuaciones de la matriz Q , se puede observar que el costo computacional aumenta a medida que el número de canales va aumentando, esto indicó que el algoritmo utilizado es altamente sensible al número de canales y que su complejidad computacional se incrementa significativamente con cada canal adicional.

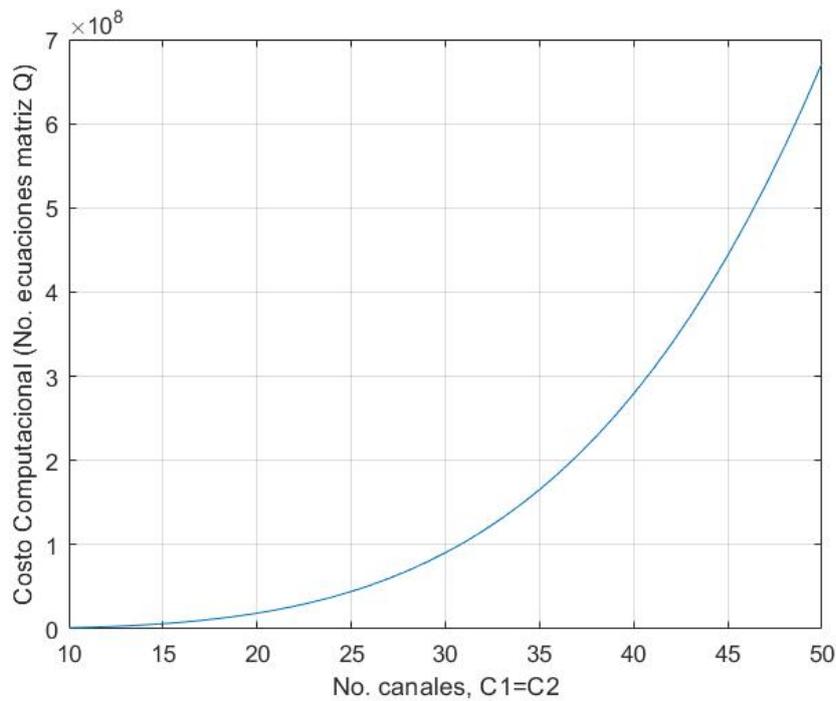


Figura 17. Relación entre el número de canales y el costo computacional en términos del número de ecuaciones de una matriz Q .

En la figura 18 se muestra la relación entre el número de canales y el costo computacional, en donde el mismo se midió en términos de ejecución en segundos. En el eje X se representa el número de canales, que va desde 10 hasta 50, que se refiere a un sistema de comunicación donde el número de canales influye en la complejidad del cálculo, mientras que en el eje Y se representa el costo computacional, medido en segundos y se analizó que el costo computacional aumenta a medida que aumenta el número de canales.

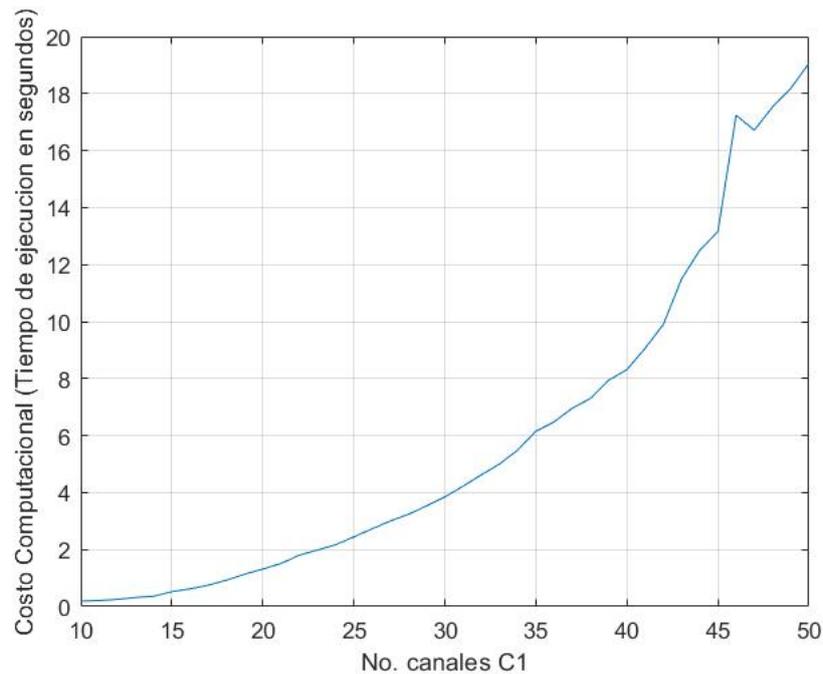


Figura 18. Relación entre el número de canales y el costo computacional, en donde el mismo se midió en términos de ejecución en segundos.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones y Recomendaciones

5.1.1 Conclusiones

- El modelo de Márkov diseñado es una herramienta analítica útil para simular y analizar el comportamiento de una red de radio cognitiva, permitiendo identificar factores clave como la probabilidad de bloqueo de los usuarios secundarios, probabilidad de terminación forzosa y throughput. A través de este modelo, se ha logrado cuantificar el impacto de diferentes parámetros como la carga de tráfico, la movilidad de los usuarios y la intensidad de interferencia en el rendimiento de la red.
- La probabilidad de bloqueo se ha consolidado como una métrica clave para evaluar el rendimiento de la red de radio cognitiva, al minimizar esta probabilidad se garantiza una mayor calidad de servicio para los usuarios secundarios.
- A través de la evaluación del modelo, se ha logrado identificar los estados más críticos de la red y cuantificar la probabilidad de transición entre ellos. Esto ha permitido obtener estrategias de gestión del espectro más eficientes, asignando eficientemente los recursos y minimizando la interferencia con los usuarios primarios.
- Los resultados de las simulaciones muestran que el rendimiento de la red de radio cognitiva presenta una baja probabilidad de bloqueo, incluso en condiciones de alta demanda, esto se debe a la creación de mecanismos de detección de oportunidades espectrales eficientes y a la utilización de algoritmos de asignación de recursos que mejoran el uso del espectro.

5.1.2 Recomendaciones

- Utilizar el software de simulación MATLAB y combinarlo con software open source como Python para realizar este tipo de simulaciones, ya que ofrecen una gran cantidad de funciones que son de gran utilidad al momento de diseñar una red de radio cognitiva.
- Hacer uso de un computador de alto rendimiento, para así obtener resultados en tiempos moderados a la hora de evaluar el costo computacional.
- Considerar otras métricas de rendimiento como el retardo, la tasa de bits y la eficiencia espectral para realizar un análisis de sensibilidad y evaluar como los diferentes parámetros del sistema afectan la probabilidad de bloqueo en las nuevas métricas de rendimiento.
- Implementar un prototipo de la red de radio cognitiva para validar los resultados obtenidos a través de simulaciones y comparar los mismos con datos de redes de radio cognitivas reales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Hassan, M. Singh, y K. Hamid, «Overview of Cognitive Radio Networks», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1831, n.º 1, p. 012013, mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1831/1/012013.
- [2] A. Nasser, H. Al Haj Hassan, J. Abou Chaaya, A. Mansour, y K.-C. Yao, «Spectrum Sensing for Cognitive Radio: Recent Advances and Future Challenge», *Sensors*, vol. 21, n.º 7, Art. n.º 7, ene. 2021, doi: 10.3390/s21072408.
- [3] A. Khader y R. Hagem, «Cognitive Radio: An Intelligent Wireless Communication System: A Survey», vol. 6, feb. 2019.
- [4] G. Nencioni, R. G. Garroppo, y R. F. Olimid, «5G Multi-Access Edge Computing: A Survey on Security, Dependability, and Performance», *IEEE Access*, vol. 11, pp. 63496-63533, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3288334.
- [5] M. Fraz, M. M. A. Muslam, M. Hussain, R. Amin, y J. Xie, «Smart sensing enabled dynamic spectrum management for cognitive radio networks», *Frontiers in Computer Science*, vol. 5, 2023, Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fcomp.2023.1271899>
- [6] K. A. Guadalupe Chafla, «Análisis del proceso rampa de potencia en sistemas inalámbricos de cuarta generación (4G) en comunicación masiva IoT para incrementar la probabilidad de acceso satisfactorio.», bachelorThesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo, 2023. Accedido: 13 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12158>
- [7] «La Primera Generación de Telefonía Móvil | PDF | Gsm | Teléfonos móviles», Scribd. Accedido: 14 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/404461211/La-Primera-Generacion-de-Telefonia-Movil>
- [8] R. & S. International, «Breve historia: desde 1G hasta 6G». Accedido: 14 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.rohde-schwarz.com/es/acerca-de/magazine/brief-history-1g-to-6g/breve-historia-de-1g-a-6g_256390.html
- [9] «Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G», VIU Internacional. Accedido: 14 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.universidadviu.com/int/actualidad/nuestros-expertos/evolucion-de-la-red-de-comunicacion-movil-del-1g-al-5g>
- [10] «Telefonía móvil 3G - EcuRed». Accedido: 14 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Telefon%C3%ADa_m%C3%B3vil_3G
- [11] F. E. C. Fernando, «ESTUDIO DE LA INFRAESTRUCTURA Y EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO EN LA EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA 4G Y SU CONVERGENCIA A 5G EN REDES DE TELEFONÍA MÓVIL EN EL ECUADOR».
- [12] M. G. Soto, «Tecnologías de comunicación móvil de quinta generación (5G).», Medium. Accedido: 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://marvin-soto.medium.com/tecnolog%C3%ADas-de-comunicaci%C3%B3n-m%C3%B3vil-de-quinta-generaci%C3%B3n-5g-cae5fc10d2e>

- [13] L. R. R. Iviricu, J. M. D. Hernández, y R. P. Portales, «La radio cognitiva: desafíos futuros en el uso del espectro radioeléctrico», *Avances*, vol. 22, n.º 1, pp. 139-167, 2020.
- [14] Y. Arjoune y N. Kaabouch, «A Comprehensive Survey on Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Recent Advances, New Challenges, and Future Research Directions», *Sensors*, vol. 19, p. 126, ene. 2019, doi: 10.3390/s19010126.
- [15] D. W. Alomoto Chicaiza y I. J. Martínez Báez, «Análisis y simulación de algoritmos para detección de espectro en radio cognitiva», bachelorThesis, Quito, 2018., 2018. Accedido: 17 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19078>
- [16] «What Is Cognitive Radio (CR) and How Does It Work?», Networking. Accedido: 7 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/cognitive-radio>
- [17] J. Hernández, D. López, y N. Vera, «Primary user characterization for cognitive radio wireless networks using long short-term memory», *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 14, n.º 11, p. 1550147718811828, nov. 2018, doi: 10.1177/1550147718811828.
- [18] N. Restrepo Valencia y M. W. Batioja Bravo, «Modelo para el análisis de riesgo crediticio basado en el modelo de Markov para una empresa del sector alimenticio», 2022, Accedido: 17 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10784/31542>
- [19] Q. Wang y M. Qingxiu, «Joint Resource Allocation Optimization for the Wireless Backhaul Link of User-Centric Cell-Free NOMA Networks», *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, pp. 1-13, ago. 2022, doi: 10.1155/2022/3599520.
- [20] J. A. R. García, D. J. M. Palacios, y C. A. H. Suárez, «Evaluación de un algoritmo para selección de oportunidades espectrales en redes inalámbricas cognitivas», *Revista Vínculos*, vol. 16, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2019, doi: 10.14483/2322939X.15754.
- [21] C. Hernández, D. Giral-Ramírez, y L. Pedraza, «Retardo en Redes Inalámbricas Colaborativas», *Revista Científica*, vol. 1, pp. 122-130, abr. 2020, doi: 10.14483/23448350.15022.
- [22] A. F. V. León y A. Guamo, «Comunicación Basada en Radio Cognitiva sobre Radio Definido por Software», *Revista Tecnológica - ESPOL*, vol. 32, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2020, doi: 10.37815/rte.v32n2.736.