



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Maestría en Ciencias y Tecnologías de la Información

**Algoritmo para acceso al medio
en redes inalámbricas cognitivas**

Idónea Comunicación de Resultados
para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS
EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
Presentada por

Jesús Hernández Guillén

Asesor:

Dr. Enrique Rodríguez de la Colina

Dr. Marcelo Carlos Mejía Olvera

Dr. Ricardo Marcelín Jiménez

Dr. Enrique Rodríguez de la Colina

Defendida públicamente en la UAM Iztapalapa

Presidente: Dr. Marcelo Carlos Mejía Olvera, Instituto Tecnológico Autónomo de México
Vocal: Dr. Enrique Rodríguez de la Colina, UAM - Iztapalapa, Redes y Telecomunicaciones
Secretario: Dr. Ricardo Marcelín Jiménez, UAM - Iztapalapa, Redes y Telecomunicaciones

Resumen

Bajo la tecnología actual, el espectro radioeléctrico es un recurso natural finito por el cual se propagan las ondas electromagnéticas. Estas dan lugar a las comunicaciones inalámbricas haciendo posible la transmisión de información como: datos, imágenes, voz y sonido. Por ser finito, es necesaria una política para administrarlo eficientemente, asignar las bandas de frecuencia de forma adecuada y así dar cabida a distintos tipos de servicio y satisfacer las necesidades de comunicación de los usuarios. Dicha regulación del espectro consiste en la asignación de bandas de frecuencia a instituciones y consta de un conjunto de políticas de reparto establecidas en cada país, esta tarea es responsabilidad del gobierno. Sin embargo, estas políticas no son muy eficientes ya que existen muchas regiones del espectro que son utilizadas por debajo de su capacidad total.

Para resolver este inconveniente se propuso la tecnología de redes inalámbricas cognitivas. Estas hacen uso de los espacios disponibles en las bandas de frecuencia mediante terminales llamadas radios cognitivos, estos permiten aprovechar en la medida de lo posible los recursos del medio inalámbrico. Un componente fundamental para la operación de estas redes es el conjunto de protocolos de acceso al medio, los cuales, permiten utilizar los recursos del espectro de forma “oportunistas” al detectar periodos de inactividad en un canal que no esté siendo ocupado por otro usuario. De esta forma se aprovechan espacios en la banda de frecuencia que se encuentren temporalmente en desuso. En este proyecto se planteó como propuesta el desarrollo de un protocolo de control de acceso al medio capaz de operar en redes cognitivas, la propuesta lleva por nombre CRUAM-MAC del acrónimo *Radio Cognitivo Universidad Autónoma Metropolitana - MAC*. Entre sus características principales está la incorporación de técnicas que evitan interferir de forma considerable con las transmisiones de otros usuarios y coordinar de forma eficiente el acceso a los recursos ofreciendo una mayor velocidad de transmisión de la información. Para verificar el funcionamiento de la propuesta, se implementó una herramienta de simulación de eventos discretos. Usando esta aplicación, se evaluó el desempeño del protocolo CRUAM-MAC y el de una versión desarrollada a partir del mecanismo CSMA/CA para redes cognitivas. Esto permitió realizar una comparación del desempeño de ambos mecanismos y así validar la eficiencia y ventajas de la propuesta desarrollada en este proyecto.

El programa de simulación implementado, permite realizar la representación de diferentes protocolos de acceso al medio siendo un software escalable que hace posible la incorporación de nuevas funciones a fin de simular escenarios cognitivos más robustos. Como resultado de este proyecto, se obtuvo el protocolo CRUAM-MAC que reduce la cantidad de paquetes perdidos entre terminales de radio cognitiva durante el proceso de comunicación. También considera un mecanismo para coordinar los cambios de canal debido a la presencia de usuarios primarios, resuelve dinámicamente el problema de asignación de recursos del espectro y soluciona el problema de las terminales expuestas y ocultas presente en las redes inalámbricas.

Palabras clave: MAC, radio cognitivo, espectro radioeléctrico.

Abstract

Under current technology, the radioelectric spectrum is a natural and finite resource used to propagate the electromagnetic waves. These waves give rise to the wireless communications making possible the transmission of information like video, voice and data.

Due to this, an efficient management is needed to allocate the frequency bands to support different kind of services and to satisfy the communication user requirements. This spectrum management is made by a frequency bands allocation policy to institutions and this policy are established in every country by the government. However this policy is not really efficient, this is because there are parts of the spectrum that are underutilized. To solve this problem, the cognitive radio network technology was proposed. This uses the free spaces in the frequency bands using the cognitive radio devices and using as far as possible the resources of the wireless medium.

A key component for the operation of the cognitive radio networks is the set of protocols for the medium access which allow the use of spectrum resources to “opportunisticly” detect a channel that is not being used. This medium access control takes advantage of the spaces in the frequency band that are temporarily out of use. This project has as an objective to develop a medium access control able to operate in cognitive networks, the proposal is named CRUAM-MAC, this is for the acronym of Cognitive Radio Autonomous Metropolitan University – Medium Access Control. Among its main features are the implementation of techniques that prevent significantly interference with other user transmissions and to efficiently coordinate access to the medium resources.

To verify the performance of the proposal, a simulation tool for discrete events was implemented in this thesis project. Using this tool, we evaluated the performance of the protocol and a modify version of the mechanism CSMA/CA for cognitive networks was also tested. This allowed us to compare the performance of both mechanisms and to validate the efficiency and advantages of our proposal. The implemented simulation tool, is a scalable software which enables the addition of new functions to simulate more robust cognitive scenarios. As a result of this thesis, it was build a CRUAM-MAC proposal for cognitive networks that reduces the packet loss among CR devices during the transmission process. Also considers a mechanism to coordinate the channel moves in presence of primary users, solves dynamically the medium resources allocation and deals with the hidden and far away terminal problems in wireless networks.

Keywords-component: MAC, cognitive radio, radio electric spectrum.

Como resultado de las actividades desarrolladas en este proyecto de tesis, se realizó la publicación de un artículo de investigación titulado "*CRUAM-MAC: A Novel Cognitive Radio MAC protocol for Dynamic Spectrum Allocation*" el cual fue presentado en IEEE LATINCOM 4th IEEE Latin-American Conference on Communications el 9 de noviembre del 2012 en la ciudad de Cuenca Ecuador.

As a result of the activities developed in this thesis project, it was performed a research paper publication titled "*CRUAM-MAC: A Novel Cognitive Radio MAC protocol for Dynamic Spectrum Allocation*" that was presented in IEEE LATINCOM 4th IEEE Latin-American Conference on Communications on November 9, 2012 in the city of Cuenca Ecuador.

Agradecimientos

A Dios, por ayudarme a no desistir y superar todos los obstáculos que se me presentaron.

A la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y a la comisión del Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información por darme la oportunidad de cursar esta maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por otorgarme el financiamiento para realizar mis estudios.

Al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF) y a la UAM-Iztapalapa por su apoyo económico para la conclusión de la idónea comunicación de resultados.

A mi asesor, el Dr. Enrique Rodríguez de la Colina por permitirme realizar el proyecto de investigación con él. Le agradezco por sus consejos y apoyo durante el tiempo que trabajamos juntos así como la confianza que depositó en mí para enviarme a realizar una estancia a la Universidad de Girona en España.

Al Dr. Ricardo Marcelín Jiménez y al Dr. Marcelo Carlos Mejía Olvera por aceptar formar parte del jurado revisor de esta tesis.

A la Dra. Carolina Medina Ramírez, por dirigir mi proyecto de licenciatura y ser mi tutora en la maestría, gracias por su consejo, tiempo y apoyo.

A los profesores del Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información por sus enseñanzas que contribuyeron a mi desarrollo académico.

A mis padres J. Trinidad y María del Carmen y a mi hermana Gisel, por todo su cariño e incondicional apoyo.

A mis amigos, por haberme ayudado en mis estudios y compartir una parte de su vida y experiencia conmigo, gracias por su valiosa amistad, sin ustedes no lo habría logrado.

Contenido

Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XV
Acrónimos	XVII
1. Introducción	1
1.1 Presentación de la problemática	2
1.2 Objetivos generales y específicos del proyecto.	2
1.3 Metodología de investigación	2
1.4 Estructura del documento	3
2. Redes de comunicación inalámbricas	5
2.1 Redes inalámbricas	5
2.2 Clasificación de las redes Inalámbricas de acuerdo a su cobertura	5
Redes inalámbricas de área amplia (WWAN)	6
Redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN)	6
Redes inalámbricas de área local (WLAN)	7
Redes WLAN sin infraestructura	8
Redes móviles <i>ad-hoc</i> (MANET)	8
Redes vehiculares <i>ad-hoc</i> (VANET)	8
Redes inalámbricas mesh (WMNS)	9
Redes inalámbricas de área personal (WPAN)	9
2.3 Control de acceso al medio	10
Acceso múltiple por división de espacio (SDMA)	16
Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA)	17
TDM fijo.	17
Aloha clásico	18
Aloha ranurado	18
Acceso múltiple por detección de portadora (CSMA)	18
Acceso múltiple por demanda asignada (DAMA)	19

Acceso múltiple por reserva de paquetes (PRMA).....	19
Reservación TDMA	19
Acceso múltiple con prevención de colisiones (MACA).....	20
Poleo (Pooling)	20
Acceso múltiple por detección de impedimento (ISMA).....	20
Acceso múltiple por división de código (CDMA)	21
Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA).....	22
2.4 Clasificación de los protocolos de acceso al medio.	23
2.5 Redes de radio cognitivos.....	26
2.6 Radios cognitivos.....	29
3 Estado del arte.	31
3.1 Clasificación de protocolos MAC para radios cognitivos	33
Protocolo MAC cognitivo para redes inalámbricas multicanal (C-MAC).....	34
MAC sincronizado para redes de radio cognitivas multi-hop (SYN-MAC).....	34
MAC descentralizado para acceso oportunista al espectro en redes <i>ad-hoc</i> (MAC POMDP)...	34
3.2 Simuladores de eventos discretos	35
Simulador de red (ns-2).....	35
Simulador de red de pruebas (NEST)	36
Simulador modular de eventos discretos orientado a objetos en C++ (OMNET++)	36
Librería de simulación para sistemas móviles de información global (GloMoSim).....	36
Herramienta optimizada para la ingeniería de redes (OPNET).....	36
Simulador de red de la Universidad Nacional Chiao Tung (NCTUns).....	37
3.3 Justificación de la herramienta de simulación de eventos discretos	37
3.4 Diseño de una herramienta de simulación.....	38
4 Desarrollo de la propuesta.	43
4.1 Protocolo de acceso al medio O-CSMA/CA.....	43
4.2 Protocolo de acceso al medio propuesto CRUAM-MAC.....	45
5 Evaluación de desempeño del protocolo CRUAM-MAC	53

5.1 Análisis de desempeño del protocolo CRUAM-MAC sin escalabilidad	53
5.2 Análisis de desempeño del protocolo CRUAM-MAC con escalabilidad.	56
Conclusiones.	61
Trabajo futuro.	63
Referencias	65
Apéndice.	69

Lista de Figuras

- Figura 2.1 Representación de las capas del protocolo IEEE 802.11 y el modelo OSI
- Figura 2.2 Implementación de la capa física y sus componentes
- Figura 2.3 Mecanismo de acceso múltiple por división de espacio (SDMA)
- Figura 2.4 Mecanismo de acceso por división de tiempo (TDMA)
- Figura 2.5 Acceso múltiple por división de código (CDMA)
- Figura 2.6 Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)
- Figura 2.7 Diagrama de clasificación de protocolos de acceso al medio
- Figura 2.8 Utilización del espectro radioeléctrico
- Figura 2.9 Conjunto de etapas del ciclo cognitivo
- Figura 3.1 Técnicas para compartir el espectro con los usuarios primarios
- Figura 3.2 Estructura que representa el estado de cuatro canales en el medio inalámbrico
- Figura 3.3 Documentación de la aplicación en formato HTML
- Figura 4.1 Diagrama de tiempos del protocolo de acceso al medio O-CSMA/CA
- Figura 4.2 Diagrama de tiempos del protocolo de acceso al medio CRUAM-MAC
- Figura 4.3 Diagrama de flujo del protocolo de acceso al medio CRUAM-MAC
- Figura 4.4 Trama de datos del protocolo CRUAM-MAC indicando el tamaño en bytes de cada campo
- Figura 5.1 Desempeño con cambios de canal y disponibilidad de canales de respaldo garantizada
- Figura 5.2 Desempeño con cambios de canal y disponibilidad de canales de respaldo no garantizada
- Figura 5.3 Goodput del sistema variando el tamaño de los paquetes
- Figura 5.4 Desempeño del sistema con 20 CR presentes considerando hasta seis canales de respaldo
- Figura 5.5 Desempeño del sistema con 20 CR comunicándose usando hasta 5 canales de respaldo
- Figura 5.6 Desempeño con cambios de canal y sin disponibilidad garantizada de canales de respaldo
- Figura 5.7 Goodput del sistema con cambios de canal y PU presentes en el medio

Lista de Tablas

Tabla 1.1	Aplicaciones del espectro radioeléctrico
Tabla 2.1	Clasificación de redes inalámbricas de acuerdo a su cobertura geográfica
Tabla 2.2	Características de los mecanismos de acceso al medio
Tabla 3.1	Protocolos de acceso al medio para redes cognitivas
Tabla 5.1	Valor de los parámetros para evaluar el desempeño del protocolo propuesto

Acrónimos

DSA	Acceso dinámico del espectro ' <i>Dynamic Spectrum Access</i> '
CR	Radio cognitiva ' <i>Cognitive Radio</i> '
PU	Usuarios primarios ' <i>Primary Users</i> '
SU	Usuarios secundarios ' <i>Secondary Users</i> '
MAC	Control de acceso al medio ' <i>Medium Access Control</i> '
NAV	Vector de ubicación de red ' <i>Network Allocation Vector</i> '
FES	Trama de intercambio de secuencias ' <i>Frame Exchange Sequences</i> '
SED	Simulador de eventos discretos
WLAN	Red inalámbrica de área local ' <i>Wireless Local Area Networks</i> '
WWAN	Red inalámbrica de área amplia ' <i>Wireless Wide Area Network</i> '
WMAN	Red inalámbrica de área metropolitana ' <i>Wireless Metropolitan Access Network</i> '
WPAN	Red inalámbrica de área personal ' <i>Wireless Personal Area Networks</i> '
PSTN's	Redes telefónicas públicas conmutadas ' <i>Public Switched Telephone Network</i> '
RSS	Subsistemas de estaciones de radio ' <i>Radio Station Subsystem</i> '
NSS	Subsistemas de conmutación de red ' <i>Network Switching Subsystem</i> '
OMSS	Subsistemas de operación y mantenimiento ' <i>Operation and Maintenance Subsystem</i> '
WiMax	Redes de interoperabilidad mundial para acceso por microondas ' <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> '
QoS	Calidad de servicios ' <i>Quality of service</i> '
LOS	Línea de vista ' <i>Line of Sight</i> '
CCK	Modulación de código complementario ' <i>Complementary Code Keying Modulation</i> '
OFDM	División de frecuencias ortogonales multiplexadas ' <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> '
ISM	Banda de transmisión de uso no comercial en áreas industrial, científica y médica ' <i>Industrial, Scientific and Medical</i> '
DSSS	Secuencia directa de espectro expandido ' <i>Direct-Sequence Spread Spectrum</i> '
MIMO	Múltiples entradas-múltiples salidas ' <i>Multiple Input Multiple Output</i> '

VANET	Red <i>ad-hoc</i> vehicular ' <i>Vehicular ad-hoc Network</i> '
MANET	Red <i>ad-hoc</i> móvil ' <i>Mobile ad-hoc Network</i> '
OSI	Modelo de interconexión de sistemas abiertos ' <i>Open Systems Interconnection</i> '
DSAP	Punto de acceso al servicio de destino ' <i>Destination Service Access Point</i> '
SSAP	Punto de acceso al servicio de origen ' <i>Source Service Access Point</i> '
LLC	Control de enlace lógico ' <i>Logic Link Control</i> '
FHSS	Frecuencia de salto de espectro expandido ' <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> '
DCF	Función de coordinación distribuida ' <i>Distributed Coordination Function</i> '
PCF	Función de coordinación puntual ' <i>Point Coordination Function</i> '
BSS	Conjunto básico de servicios ' <i>Basic Service Set</i> '
MACA	Acceso múltiple con prevención de colisiones ' <i>Multiple Access Collision Avoidance</i> '
RTS	Solicitud de envío ' <i>Request to Send</i> '
CTS	Listo para envío ' <i>Clear to Send</i> '
IFS	Espacio intertramas ' <i>Interframe Space</i> '
TSF	Función de sincronización temporal ' <i>Timing Synchronization Function</i> '
SDMA	Acceso múltiple por división de espacio ' <i>Space Division Multiple Access</i> '
TDMA	Acceso múltiple por división de tiempo ' <i>Time Division Multiple Access</i> '
CSMA	Acceso múltiple por división de portadora ' <i>Code Division Multiple Access</i> '
DAMA	Acceso múltiple por asignación de demanda ' <i>Demand Assignment Multiple Access</i> '
PRMA	Acceso múltiple por reserva de paquetes ' <i>Packet Reservation Multiple Access</i> '
ISMA	Acceso múltiple por detección de impedimento ' <i>Inhibit Sense Multiple Access</i> '
CDMA	Acceso múltiple por división de código ' <i>Code Division Multiple Access</i> '
ITU	Unión internacional de telecomunicaciones ' <i>International Telecommunication Union</i> '
SDR	Radio definida por software ' <i>Software Defined Radio</i> '
FCC	Comisión federal de comunicaciones ' <i>Federal Communications Commission</i> '
CCC	Canal de control común ' <i>Common Control Channel</i> '
FCS	Secuencia de verificación de la trama ' <i>Frame Check Sequence</i> '

Capítulo 1

Introducción

Bajo la tecnología actual, el espectro radioeléctrico es un recurso natural finito por el que se propagan las ondas electromagnéticas. Estas dan lugar a los sistemas de comunicaciones y transmisión de datos como voz y video de forma inalámbrica. Algunos de los servicios que son posibles gracias a este recurso se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Aplicaciones del espectro radioeléctrico [1].

SECTOR	ACTIVIDAD	SECTOR	ACTIVIDAD
TELECOMUNICACIONES	TELEFONÍA FIJA	TRANSPORTE	CONTROL DE TRÁFICO AÉREO
	TELEFONÍA MÓVIL		TRANSPORTE MARÍTIMO
	RADIO BÚSQUEDA		SISTEMAS GPS
	MULTIMEDIA	GOBIERNO	DEFENSA
	REDES PRIVADAS		EMERGENCIAS
RADIODIFUSIÓN	TV CONVENCIONAL	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO (I + D)	CIENCIA ESPACIAL
	TV VÍA SATÉLITE		OBSERVACIONES DE LA TIERRA
	RADIO		RADIOASTRONOMÍA

En la actualidad existe una gran cantidad de sistemas de telecomunicaciones que utilizan el medio inalámbrico para transmitir, esto ha generado una mayor demanda de recursos del espectro y ha traído consigo la falta de espacios disponibles en la banda de frecuencias para dar cabida a las necesidades de todos los usuarios. Para solucionar este inconveniente, se han considerado varias medidas entre las cuales se encuentra la implementación de mejoras en la codificación y modulación de la señal. Un ejemplo es el caso de la televisión que ha pasado de ser analógica a digital, gracias a esto es posible transmitir cuatro o cinco canales en el mismo ancho de banda donde antes se transmitía solo uno. Numerosas campañas de medidas del espectro radioeléctrico han demostrado que el espectro asignado es mal utilizado. Debido a esto, se plantea un nuevo modelo de uso del espectro conocido como acceso dinámico del espectro *'dynamic spectrum access'* (DSA) y la creación de redes de radio cognitivas *'cognitive radio networks'* (CRN) basadas en este modelo, las cuales, permiten hacer un uso más eficiente del espectro sin necesidad de modificar la asignación de frecuencias actual [2].

La tecnología de redes inalámbricas cognitivas surge como una solución al problema de la asignación de bandas en el espectro radioeléctrico, debido a esto los dispositivos que las conforman necesitan de mecanismos que les permitan acceder al medio inalámbrico de transmisión de una manera eficiente [3]. En este proyecto, se realizó la propuesta de un protocolo de acceso al medio MAC para redes inalámbricas cognitivas. Las bases de este trabajo parten de un proceso de investigación del estado del arte realizado en el tema de redes de radios cognitivos, los protocolos MAC para éstas y la forma en que desempeñan sus funciones de acceso al medio. La propuesta generada, tiene como característica principal resolver de forma dinámica la asignación

de recursos del espectro radioeléctrico para transmitir datos sin causar interferencia con las transmisiones de otros usuarios.

1.1 Presentación de la problemática

En la actualidad, existe una administración del espectro radioeléctrico que otorga licencias para operar en frecuencias fijas. Sin embargo, la asignación de tales frecuencias y un aumento en su demanda ha dado lugar a la escasez de bandas libres para operar nuevos servicios. Con el objetivo de optimizar y hacer un mejor uso de los recursos del espectro radioeléctrico, se planteó el desarrollo de los radios cognitivos '*cognitive radio*' (CR), los cuales son un conjunto de dispositivos de comunicación inalámbrica que adaptan sus parámetros de operación para comunicarse eficientemente haciendo uso de porciones libres en el espectro radioeléctrico [3]. Los CR funcionan transmitiendo en los espacios de la banda de frecuencia que no se utilizan por los usuarios que tienen una licencia para hacerlo (usuarios primarios o PU), esto es, realizan un acceso "oportunista" al medio para que los usuarios de radio cognitivo (usuarios secundarios o SU) puedan transmitir sin que su actividad interfiera o afecte de algún modo la calidad de la transmisión de los PU. En las CRN, los protocolos MAC desempeñan un papel muy importante debido a que permiten explotar al máximo los espacios del espectro coordinando de una forma eficiente el acceso de los SU [4].

1.2 Objetivos generales y específicos

Como objetivo general de este proyecto, se plantea diseñar un modelo de simulación de acceso al medio para redes inalámbricas cognitivas en el tema específico de acceso oportunista y dinámico del espectro. Como objetivo específico y formulación del problema se plantea el desarrollo de una técnica de acceso al medio, la cual requiere de un diseño especializado ya que permitirá compartir de forma más eficiente el espectro radioeléctrico entre las terminales CR que desean transmitir información. En su mayoría, los protocolos MAC desarrollados basan su funcionamiento en técnicas de acceso utilizadas para redes inalámbricas de área local y amplia. Algunas de estas técnicas, son la división de los recursos del medio inalámbrico en tiempo o por frecuencia considerando modificaciones como el mecanismo de vector de ubicación de red '*network allocation vector*' (NAV) a fin de adaptar su funcionamiento a ambientes cognitivos.

1.3 Metodología de Investigación

El proceso de investigación realizado en este proyecto de tesis de la Maestría en Ciencias y Tecnologías de la Información consistió de las siguientes etapas:

- Proceso de Investigación del estado del arte:
 - Estudio de redes inalámbricas.
 - Protocolos MAC en redes inalámbricas.
 - Redes inalámbricas cognitivas.
 - Clasificación de los protocolos de acceso al medio para redes cognitivas.
 - Estudio de la simulación por eventos discretos.
- Proceso de desarrollo:
 - Desarrollo de la propuesta de protocolo de acceso al medio para redes inalámbricas cognitivas.
 - Implementación de un simulador de eventos discretos (SED) en el lenguaje Python para protocolos MAC de radio cognitivos a fin de evaluar el protocolo propuesto. Esta herramienta de simulación está diseñada específicamente para evaluar el comportamiento de los protocolos de acceso al medio en redes cognitivas.
- Evaluación de la propuesta
 - Simulación del protocolo de acceso al medio propuesto usando la aplicación de simulación de eventos discretos implementada y obtención de resultados de desempeño.
- Reporte de resultados
 - Comparación del desempeño de la propuesta con una versión del protocolo CSMA/CA para redes cognitivas.
 - Análisis de resultados obtenidos.

1.4 Estructura del documento

La estructura y contenido de los capítulos está organizada de la siguiente manera.

Capítulo 2

Contiene información referente a las redes inalámbricas y sus principales características.

Capítulo 3

Incluye la información obtenida en el proceso de investigación del estado del arte realizado sobre los protocolos de acceso al medio para redes inalámbricas, su funcionamiento y algunos aspectos que se consideran en su diseño.

Capítulo 4

Explica el diseño del protocolo propuesto mencionando aspectos como su funcionamiento y los elementos de su arquitectura. También se incluye Descripción del diseño y desarrollo de la herramienta de simulación de eventos discretos usada para evaluar el desempeño del protocolo.

Capítulo 5

Discusión e interpretación de resultados obtenidos del desempeño del protocolo propuesto. Se realiza la comparación entre el desempeño del protocolo propuesto en este trabajo y otra propuesta MAC.

Redes de comunicaciones inalámbricas

La manera en la que se ha transformado nuestra sociedad de acuerdo a la evolución tecnológica de las computadoras y dispositivos similares como celulares o PDAs, ha permitido que los usuarios cuenten con acceso a la red de telecomunicaciones de forma inalámbrica. Esto ofrece movilidad para desplazarse a distintos puntos y tener acceso a los servicios de transferencia de datos de una manera confiable sin pasar por alto medidas de calidad y seguridad en los servicios [5].

2.1 Redes inalámbricas

Existen dos arquitecturas de red, estas son el modo con infraestructura y sin infraestructura (inalámbricas), a estas últimas también se les conoce como redes *ad-hoc*. Lo que distingue a las redes con infraestructura de las *ad-hoc* es que estas últimas no cuentan con una topología fija, por lo que los vecinos de cada nodo suelen cambiar constantemente.

En una red con infraestructura, si un enrutador tiene una ruta válida a algún destino, esa ruta seguirá siendo la misma de manera indefinida a no ser que ocurra una falla en el sistema que la afecte. En una red *ad-hoc*, los cambios constantes de la topología implican también cambios en la validez de las rutas entre nodos. Entre las redes inalámbricas se encuentran las de telefonía celular y sistemas satelitales entre otros. Algunas de las prestaciones y ventajas ofrecidas frente a las redes modo infraestructura son las siguientes:

- **Movilidad:** ofrece servicios de comunicación a todo usuario de la red sin importar su localización.
- **Facilidad de instalación:** evita trabajos que generan afectaciones a las estructuras de edificios debido a la necesidad de colocar cables por muros y techos.
- **Flexibilidad:** se puede contar con el servicio en terminales ubicadas en lugares donde el cable no puede llegar.
- **Reducción de costos:** gastos de instalación más económicos.
- **Escalabilidad:** permite la incorporación de nuevas terminales a la red.

2.2 Clasificación de las redes inalámbricas de acuerdo a su cobertura

Una forma de clasificación para las redes inalámbricas se realiza de acuerdo a su extensión territorial, estas son las redes inalámbricas de área amplia (WWAN), de área metropolitana (WMAN), de área local (WLAN) y de área personal (WPAN). En la tabla 2.1 se muestra la clasificación de estas de acuerdo a su rango de cobertura [6][7].

Tabla 2.1 Clasificación de redes inalámbricas de acuerdo a su cobertura geográfica.

	WPAN	WLAN	WMAN	WWAN
UBICACIÓN	ÁREA PERSONAL	CAMPUS	CIUDADES	PAÍSES
ESTÁNDAR	802.15	802.11	802.16	802.2
EXTENSIÓN	DIST < 10 m	10m < DIST < 1 Km	1 Km < DIST < 10 Km	10 Km < DIST < 100 Km

A continuación, se detalla cada una de las redes describiendo sus características y algunos puntos sobre su funcionalidad.

Redes inalámbricas de área amplia (WWAN)

Es el conjunto de redes inalámbricas capaces de cubrir toda una región o país. Están basadas en tecnología celular y han aparecido como evolución a las redes de comunicaciones de voz. Son definidas por el estándar IEEE 802.20, hacen uso de los servicios de las redes telefónicas públicas conmutadas '*public switched telephone network*' (PSTN's) para hacer y recibir llamadas provenientes de usuarios que usan terminales en redes modo infraestructura. Para estas redes, es requerido un mayor número de servicios para soportar sus funciones, estos son: subsistemas de estaciones de radio '*radio station subsystem*' (RSS), subsistemas de conmutación de red '*network switching subsystem*' (NSS) y subsistemas de operación y mantenimiento '*operation and maintenance subsystem*' (OMSS). El subsistema de radio es responsable de brindar y mantener rutas de transmisión entre equipos del usuario y el NSS, esto incluye la administración de radio entre la terminal del usuario y el resto del sistema WWAN. El NSS tiene la responsabilidad de administrar las comunicaciones y conectar los equipos a las redes adecuadas o de otros usuarios. El NSS no está en contacto directo con los equipos y el subsistema de radio ni en contacto con redes externas. El equipo, subsistema de radio y el NSS constituyen la parte operacional de los sistemas WWAN [8].

Redes inalámbricas de área metropolitana (WMAN)

Se les conoce también como redes de interoperabilidad mundial para acceso por microondas (WiMAX) y es el sistema de comunicación digital inalámbrico conocido como IEEE 802.16. Puede proveer acceso inalámbrico de banda ancha por encima de los 5 km de distancia, y para estaciones fijas de 5 a 15 kilómetros. Soporta fácilmente tasas de datos similares a las redes inalámbricas de área local definidas por el IEEE 802.11, sin embargo la influencia de las interferencias la disminuye. También incluye funciones de seguridad robustas y calidad de servicios '*quality of service*' (QoS) para soportar servicios que requieren baja latencia como voz y video. Cuentan con características como escalabilidad y seguridad. La familia de estándares IEEE 802.16 es:

- **802.16:** fue el primer estándar oficial, requiere un enlace de línea de vista '*line of sight*' (LOS) y puede operar en cualquier lugar en la banda de 10-66 GHz. Es adecuado para conexiones inalámbricas fijas.
- **802.16a/RevD:** usa frecuencias más bajas que van de 2 a 11 GHz para permitir transmisiones sin LOS manteniendo una buena eficiencia espectral. Es usado en pequeños negocios y por usuarios residenciales entre otros.
- **802.16e:** fue diseñado para usuarios móviles que tienen necesidad de mantenerse conectados mientras se desplazan de lugar, el servicio es ofrecido siempre y cuando el usuario no se mueva a una velocidad mayor a la de 150 Km/h [9].

Redes inalámbricas de área local (WLAN)

Utilizan tecnología de radiofrecuencia que permite mayor movilidad a los usuarios. Permite disponer de acceso a la red en lugares a donde los cables de las redes de área local modo infraestructura no llegan lo cual ofrece flexibilidad en su uso. Están definidas por el estándar IEEE 802.11, su rango de cobertura puede variar dentro de un rango desde los 10 metros hasta 1 km. si se encuentra en un ambiente exteriores '*outdoor*' con LOS. Presenta varias ventajas como la tolerancia a fallos en todos los equipos y eliminación de posibles cuellos de botella que se pueden presentar en una arquitectura centralizada. Junto con los protocolos, ofrecen un ahorro significativo de energía y prolongan la duración de la batería del equipo móvil sin perder conectividad de red. Los componentes de la familia del estándar IEEE 802.11 son:

- **802.11a:** opera en la banda de 5 GHz con alcance limitado a 50 metros, usa 12 canales no empalmados de tal modo que como resultado se disponen de doce puntos de acceso para diferentes canales en la misma área sin interferencia con algún otro. Utiliza división de frecuencias ortogonales multiplexadas '*orthogonal frequency división multiplexing*' (OFDM), la cual divide una señal de datos a través de 48 sub-portadoras separadas por un canal de 20 MHz para proveer transmisiones en rangos de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 o 54 Mbps.
- **802.11b:** opera en una frecuencia de 2.4 GHz de uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en las áreas: industrial, científica y médica '*industrial, scientific and medical*' (ISM) y utiliza secuencia directa de espectro expandido '*dynamic spectrum allocation*' (DSSS) con modulación de código complementario '*complementary code keying modulation*' (CCK) para dispersar la señal de datos sobre una porción de aproximadamente 30 MHz de la banda de frecuencia de 2.4 GHz. Los rangos que soporta son de 1, 2, 5.5 y 11 Mbps.
- **802.11g:** opera en la banda de 2.4 GHz y las señales transmitidas utilizan aproximadamente 30 MHz. Es compatible con el 802.11b, capaz de alcanzar una velocidad de 22 Mbit/s o llegar a 54 Mbit/s para competir con los estándares que ofrecen velocidades mucho más elevadas pero que son incompatibles con los equipos

que funcionan de acuerdo al estándar 802.11b, aunque pueden coexistir en el mismo entorno debido a que las bandas de frecuencia que emplean son distintas [10][11].

- **802.11n:** permite modos de operación con un *throughput* más alto, con máximos de al menos 100 Mbps mediante el uso del denominado múltiples entradas múltiples salidas '*multiple input multiple output*' (MIMO).

Este proyecto de tesis está enfocado al desarrollo de un protocolo MAC para redes inalámbricas cognitivas, específicamente redes WLAN. Debido a esto, el tema central del estado del arte se enfoca en esta clase de redes. A continuación se incluye una descripción más amplia al respecto.

Redes WLAN sin infraestructura

A estas se les conoce como redes *ad-hoc*, es un tipo de redes que no tienen una infraestructura fija, esto implica que no tienen ningún tipo de control centralizado y que por lo tanto son flexibles y fácilmente desplegables. Dentro de estas existen varios tipos: las redes *mesh*, las redes vehiculares *ad-hoc* (VANET) y redes móviles *ad-hoc* (MANET) [12].

Redes móviles *ad-hoc* (MANET)

Son redes sin puntos de acceso donde cada nodo ejerce simultáneamente como nodo final y como encaminador. Se les conoce también como redes inalámbricas multi-salto '*multi-hop*'. Cada nodo se debe comportar como un encaminador manteniendo individualmente las rutas a otros nodos, por lo tanto, sí el número de nodos crece rápidamente el número de rutas aumentará también impactando en el tamaño de la tabla de encaminamiento y en la búsqueda del camino óptimo entre dos terminales. El problema de la escalabilidad (incremento del número de nodos en la MANET) junto con la movilidad de los nodos, puede producir un aumento en la carga (paquetes de control intercambiados por los nodos en la red) generada por el mantenimiento de las rutas consumiendo el poco ancho de banda disponible en la red reduciendo el *throughput* [13].

Redes vehiculares *ad-hoc* (VANET)

Son un caso particular de las redes MANET enfocadas a entornos vehiculares. Cada nodo en la red actúa como encaminador y tiene capacidades de encaminamiento para redirigir paquetes hacia su destino. Algunas de las características son las siguientes:

- **Autónoma:** cada nodo es autónomo con capacidad de procesar la información que se intercambia en la red.

- **Encaminamiento distribuido:** los nodos deben ser capaces de encaminar información.
- **Topología de red variable:** en una MANET los nodos se pueden mover de forma arbitraria. Esta característica es importante en el caso de las VANET ya que los vehículos suelen seguir un patrón de movimiento que puede causar pérdidas importantes de paquetes transmitidos.
- **Capacidad variable de los enlaces:** sus efectos se agravan más en las MANET porque cada nodo actúa como encaminador y la información atraviesa múltiples enlaces de capacidades diferentes lo cual afecta la transmisión de datos.
- **Terminales limitados:** en la mayoría de los casos, los nodos de este tipo de redes serán terminales ligeros colocados en vehículos con capacidades limitadas de procesamiento, comunicación y alimentación por lo que es primordial que los algoritmos utilizados optimicen estos tres recursos.

Redes inalámbricas mesh (WMNS)

Son dinámicamente auto organizadas y auto configuradas con los nodos de la red estableciendo de manera automática una red *ad-hoc* y manteniendo una conectividad *mesh* o en malla. Está compuesta de dos tipos de nodos, estos son los encaminadores y los clientes *mesh*. El encaminador *mesh*, contiene funciones de encaminamiento adicional para mantener a la red *mesh*. También tienen una movilidad mínima y constituyen el *mesh* troncal para los clientes *mesh*. Los clientes *mesh* pueden conectarse entre sí independientemente del punto de acceso, ya que todos los nodos pertenecientes a la red permiten el paso de paquetes a través de él hacia otros nodos [14].

Redes inalámbricas de área personal (WPAN)

Finalmente se encuentran las redes WPAN las cuales cubren una distancia de hasta 10 metros como máximo. Normalmente son utilizadas para conectar varios dispositivos portátiles personales y están definidas por el estándar IEEE 802.15. La comunicación se realiza bajo el concepto par a par '*peer-to-peer*' debido a que no necesita de un alto índice de transmisión de datos. Esto tiene como resultado, un bajo consumo de energía haciendo a esta tecnología adecuada para su uso con dispositivos móviles pequeños que requieran de baterías. Existen cuatro grupos de trabajo:

- **802.15.1:** estándar basado en las especificaciones del SIG de *bluetooth*, este estándar se publicó en el año 2002.
- **802.15.2:** es un modelo de coexistencia entre las WLAN y WPAN así como de los dispositivos que las envuelven.

- **802.15.3:** ofrece una alta velocidad de transmisión (20 Mbits/s o mayores), está diseñado para consumir poca energía y ofrecer soluciones a bajos costos así como aplicaciones multimedia.
- **802.15.4:** desarrolla soluciones que requieren de una baja transmisión de datos y con ello una duración en las baterías de meses e incluso de años así como una complejidad relativamente baja [11].

Las redes constan de un conjunto de dispositivos que deben compartir la capacidad de transmisión, por lo tanto, se requiere de algún método de acceso al medio con objeto de cumplir este propósito. Esta función recae en el protocolo de control de acceso al medio (MAC). A continuación, se incluye la información referente a estos protocolos incluyendo sus características operacionales y los factores que influyen en el diseño y su forma de operar en los dispositivos.

2.3 Control de acceso al medio

Para realizar el diseño de los protocolos de acceso al medio, es necesario considerar un conjunto de parámetros operacionales a fin de obtener un mecanismo cuyo funcionamiento permita a las terminales de la red inalámbrica competir por los recursos del medio. Un aspecto a considerar, es saber si la técnica del control de acceso al medio se hará de forma centralizada o distribuida. En un esquema centralizado se diseña un controlador con autoridad para conceder el acceso a la red, de modo que una estación que desee transmitir debe esperar hasta que se le conceda permiso por parte del controlador. En una red distribuida o no centralizada, las estaciones realizan conjuntamente la función de control de acceso para determinar dinámicamente el orden en el que se transmitirá. El estándar de interconexión de sistemas abiertos '*open systems interconnection*' (OSI) fue desarrollado por el comité de IEEE 802 y ha sido adoptado por las organizaciones que trabajan en la especificación de los estándares LAN. De abajo hacia arriba, la capa inferior de este modelo es la capa física e incluye funciones como la codificación/decodificación de señales, generación/eliminación del preámbulo (para sincronización) y la transmisión/recepción de bits. Por encima de la capa física se encuentra la capa de enlace de datos que realiza las funciones asociadas a los servicios ofrecidos a los usuarios, entre ellas están los siguientes:

- **En recepción:** desensamblado de tramas de datos, reconocimientos de dirección y de detección de errores.
- **Control de acceso al medio de transmisión:** interfaz con las capas superiores y control de errores y de flujo.
- **En transmisión:** re-ensamblado de datos en tramas con campos de dirección y de detección de errores.

- Interfaz con las capas superiores y control de errores y de flujo.

Los primeros tres puntos corresponden a funciones de la subcapa de control de acceso al medio y el último a la capa de control de enlace lógico 'logic link control' (LLC).

En la figura 2.1 se ilustra la disposición de las capas del protocolo.

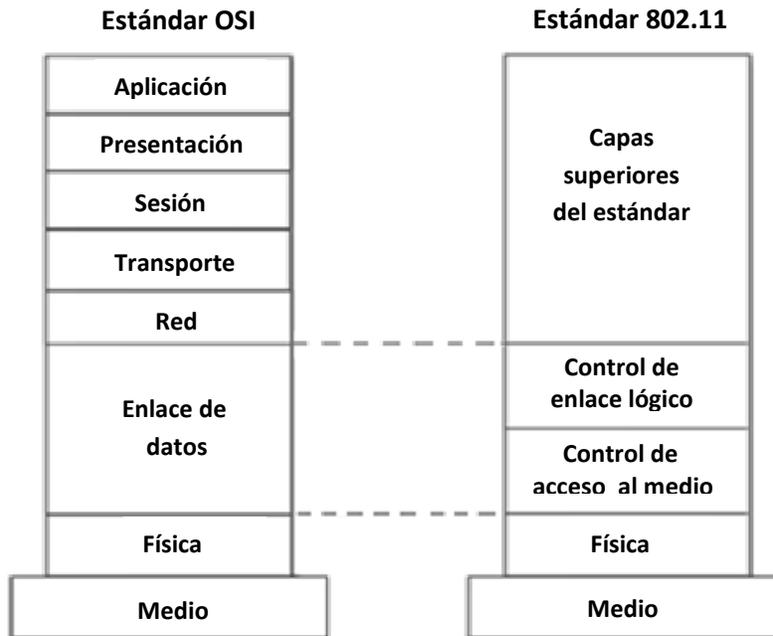


Figura 2.1 Representación de las capas del protocolo IEEE 802.11 y el modelo OSI [15].

El LLC se define en el estándar IEEE 802.2 y proporciona servicios de enlace de datos a la capa de red independientemente del medio físico. Agrega etiquetas del punto de acceso al servicio de destino 'destination service access point' (DSAP) y del punto de acceso al servicio de origen 'source service access point' (SSAP) a cada paquete recibido del nivel de red para identificar las aplicaciones (o los usuarios) involucrados en la transferencia de datos. También proporciona tres tipos de servicios, uno no orientado a conexión sin confirmaciones, otro orientado a conexión, y uno no orientado a conexión con confirmaciones. El primero es conocido como LLC de tipo1 o LLC1 y no requiere del establecimiento de una conexión extremo a extremo. Una vez establecidos los puntos de acceso al servicio en cada nodo, comienza la transferencia de datos. La capa de red del nodo fuente envía sus paquetes a través del SSAP proporcionado por la subcapa LLC y cuando lleguen al destino, el LLC del destino los enviará a su capa de red a través de su DSAP. El servicio de transferencia orientado a conexión se denomina LLC2 y garantiza la entrega de los datos utilizando números de secuencia y confirmaciones de entrega. También establece un camino de extremo a extremo a través de múltiples saltos en la red antes de comenzar la transferencia de datos. Todas las tramas que pertenezcan a la misma sesión van por el mismo camino y son entregadas en orden al destinatario. LLC2 es útil cuando los extremos de la comunicación no usan un protocolo de transporte que ofrezca este mismo servicio (como TCP). Finalmente, LLC3 proporciona un servicio sin conexión pero con confirmaciones de entrega para las tramas individuales. LCC permite a

distintos protocolos de las capas superiores acceder a distintos tipos de capas físicas, por lo que realiza la abstracción necesaria para que las capas superiores funcionen sin preocuparse del medio físico por el que se realiza las transmisiones. La subcapa de control de acceso al medio contiene el conjunto de reglas que determinan la forma de acceder al medio y enviar datos. La comunicación entre MAC's de diferentes estaciones, se realiza a través de la capa física mediante una serie de puntos de acceso al servicio donde la capa MAC invocará las primitivas de servicio. En la especificación 802.11 se encuentran dos implementaciones para la capa física, la frecuencia de salto de espectro expandido '*frequency hopping spread spectrum*' (FHSS) y la DSSS, tal como se muestra en la figura 2.2. El uso de ondas de radio en la capa física requiere de una capa física relativamente compleja. El estándar 802.11 subdivide a la capa física en dos componentes:

- **Procedimiento de convergencia de capa física (PLCP):** mapea las tramas MAC sobre el medio y las pone en el formato adecuado para ser transmitidas o recibidas entre diferentes estaciones a través de la capa PMD.
- **Dependiente del medio físico (PMD):** permite la transmisión de las tramas. Maneja directamente las comunicaciones de radio sobre el medio inalámbrico [16].

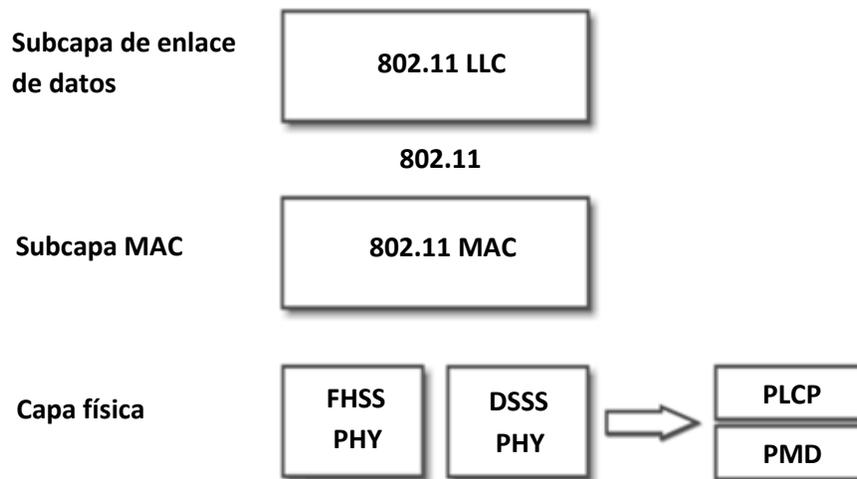


Figura 2.2 Implementación de la capa física y sus componentes [15].

Los diferentes métodos de acceso se encuentran ubicados en el nivel físico y en la parte superior del nivel de enlace o subnivel MAC. Esta última se define como el subnivel inferior y provee el acceso compartido de las tarjetas de red al medio físico, esto es, define la forma en que se va a acceder al medio de comunicación empleado en la red para el intercambio de datos. La arquitectura MAC de 802.11 para redes WLAN se compone de dos funcionalidades básicas, estas son la función de coordinación distribuida '*distributed coordination function*' (DCF) y la función de coordinación puntual '*point coordination function*' (PCF).

DCF se define como la funcionalidad que determina dentro de un conjunto básico de servicios '*basic service set*' (BSS) cuándo una estación puede transmitir y/o recibir unidades de

datos de protocolo a nivel MAC a través del medio inalámbrico. Está localizado en el nivel inferior del subnivel MAC y su funcionamiento se basa en técnicas de acceso aleatorio de contienda por el medio. El tráfico que se transmite bajo esta funcionalidad es asíncrono ya que estas técnicas de contienda introducen retardos aleatorios y no predecibles ni tolerados por los servicios síncronos. Funciona realizando reconocimientos necesarios ACKs provocando retransmisiones si no se reciben las tramas de datos correctamente. Utiliza el protocolo de acceso múltiple con prevención de colisiones (MACA) para acceder al medio y un campo *Duration/ID* que contiene el tiempo durante el cual se espera que el medio este ocupado debido a una transmisión. Además usa las tramas de solicitud de envío '*request to send*' (RTS) y listo para envío '*clear to send*' (CTS) en el emisor y receptor respectivamente para que las terminales sepan si pueden enviar un trama de datos. Esto significa que todos los nodos sabrán cuando el canal vuelva a quedar libre para intentar transmitir. La función de coordinación puntual PCF se encarga de asociar las transmisiones libres de contienda que utilizan técnicas de acceso deterministas. El estándar IEEE 802.11, define una técnica de interrogación circular desde el punto de acceso para este nivel. Esta funcionalidad está pensada para servicios de tipo síncrono que no toleran retardos aleatorios en el acceso al medio. Estos dos métodos de acceso pueden operar conjuntamente dentro de una misma celda o conjunto básico de servicios dentro de una estructura llamada supertrama. Una parte de esta supertrama se asigna al periodo de contienda permitiendo al subconjunto de estaciones que lo requieran, transmitir bajo mecanismos aleatorios. Una vez finalizado este periodo el punto de acceso toma el medio y se inicia un periodo libre de contienda en el que pueden transmitir el resto de estaciones de la celda que utilizan técnicas deterministas. El funcionamiento de PCF es totalmente compatible con el modo DCF, observándose que el funcionamiento es transparente para las estaciones.

El formato de la trama MAC de 802.11 tiene los siguientes componentes:

- **Encabezado MAC:** comprende campos de control, duración, direccionamiento y control de secuencia.
- **Cuerpo de trama de longitud variable:** contiene información específica del tipo de trama.
- **Secuencia de verificación de la trama (FCS):** contiene un código de redundancia CRC de 32 bits. Se utiliza para verificar la integridad de la información recibida en el receptor a través una secuencia de verificación de trama incorrecta.

A su vez, las tramas MAC se pueden clasificar en tres tipos:

- **Tramas de datos:** responsables de transportar la información a las capas superiores.

- **Tramas de control:** permiten la entrega de tramas entre terminales, contiene los números de secuencia de un paquete. Las estaciones receptoras utilizan este campo para re-ensamblar las tramas de datos correctamente.
- **Tramas de gestión:** donde están los servicios de distribución, permiten mantener comunicaciones a las estaciones inalámbricas. Entre ellas están las tramas piloto, de autenticación, desautenticación, de solicitud de asociación y re-asociación, de respuesta de asociación y re-asociación, y las tramas de tráfico pendiente en el punto de acceso [11].

Para determinar la disponibilidad del medio inalámbrico se utilizan dos tipos de detección de portadora: detección física y virtual. La primera es provista por la capa física y depende del tipo de modulación. La virtual, hace uso del valor del NAV que es un contador residente en cada estación y representa la cantidad de tiempo que tardó en transmitirse la trama anterior desde cualquier estación. El valor de NAV tiene que ser cero antes de que una estación intente enviar una trama, de esta forma se sabe que durante ese tiempo una estación estará enviando datos y si otra terminal trata de transmitir entrará en estado de contención lo cual se trata de evitar.

Antes de transmitir una trama, la estación calcula el tiempo necesario de espera basándose en la longitud del paquete y en la tasa de transmisión y lo sitúa en el campo de duración en el encabezado de la trama. Cuando cualquier estación recibe la trama, toma el campo de duración y lo utiliza para establecer su correspondiente NAV. Este proceso reserva el medio para la estación emisora y evita que otras estaciones comiencen a transmitir mientras esta no haya terminado de realizar su transmisión actual. Otro concepto importante relacionado con el acceso al medio, es el espaciamiento entre trama '*interframe space*' (IFS), ya que es una acción ejecutada si el medio está disponible. IFS es el tiempo de intervalo entre tramas, durante este periodo una estación estará escuchando el medio antes de transmitir. Se definen cuatro espaciados para dar prioridad de acceso al medio inalámbrico.

- **Espacio intertramas corto '*short inter frame space*' (SIFS):** es el periodo de espera más corto. Es utilizado para transmitir los reconocimientos o cada uno de los fragmentos de una trama.
- **Espacio intertramas PCF '*PCF inter frame space*' (PIFS):** es utilizado por las estaciones para ganar prioridad de acceso en los periodos libres de contienda.
- **Espacio intertramas DCF '*DCF interframe space*' (DIFS):** se utiliza para el envío de tramas MAC y tramas de gestión.
- **Espacio intertramas extendido '*extended Interframe space*' (EIFS):** controla la espera en los casos en los que se detecta la llegada de una trama errónea. Espera un tiempo suficiente para que le vuelvan a enviar la trama otra vez.

La mayoría del tráfico 802.11 utiliza la función DCF y el modo de acceso es el siguiente:

Se verifica que el medio esté libre. Si lo está por un tiempo mayor a un intervalo DIFS, la transmisión vuelve a comenzar. Si la trama anterior fue recibida sin errores, el medio estará libre al menos mientras dure el DIFS, de lo contrario, estará libre por un tiempo equivalente a un periodo EIFS. La recuperación de errores es responsabilidad de la estación que envía la trama. Cualquier falla incrementa un contador llamado contador de reintentos y la transmisión se repite. Una estación tiene dos contadores de reintentos: contador corto y largo.

El contador corto toma el valor de cero si se recibe un CTS como respuesta a un RTS enviado previamente, si se recibe un ACK después de una transmisión o si se recibe una trama *broadcast* o *multicast*. En el caso del contador largo, se vuelve cero si se recibe un ACK para una trama mayor que el umbral RTS ó si se recibe una trama *broadcast* o *multicast* [10][17]. Otros factores importantes son los mecanismos de sincronización-gestión de potencia.

La sincronización es posible mediante una función de sincronización temporal '*timing synchronization function*' (TSF) la cual es responsable de mantener los relojes de las estaciones sincronizados. Esto es importante para el mantenimiento de la potencia, la coordinación realizada por el PCF y la sincronización de los patrones de saltos de frecuencia FHSS. Para el modo *ad-hoc*, la estación que indique la red establecerá una tasa de transferencia de portadoras que permitan la sincronización, a esto se le llama intervalo piloto. Si el control está distribuido, la responsabilidad de mantener la sincronización recae entre todas las estaciones.

Como los nodos de una red *ad-hoc* cuentan con movilidad, es necesario disponer de mecanismos que eviten un exceso en el gasto de energía. Se considera que los nodos pueden estar en dos estados: dormido '*sleep*' y despierto '*awake*'. Dormido hace referencia a un estado en el que un nodo no puede recibir ni enviar señales, para permanecer en este estado una terminal debe almacenar en un buffer los datos que desea enviar almacenándolos hasta que despierte para poderlos transmitir. Con la gestión de potencia, las estaciones pueden adoptar un modo de potencia limitado, lo cual implica que la estación despertará solo en determinados momentos para conectarse a una red.

El control de las estaciones se lleva a cabo por el punto de acceso, este tendrá conocimiento de que estación se ha asociado en este modo. Los protocolos pueden clasificarse también en síncronos y asíncronos. Los protocolos síncronos cuentan con esquemas planificadores de acceso que asignan a las estaciones distintas ranuras de tiempo o diferentes canales de datos para transmitir. Los mecanismos asíncronos son adecuados para un canal con cargas de tráfico alta y media, debido a que todas las ranuras son susceptibles a ser utilizadas pero tiene un mal rendimiento en cargas de tráfico bajas ya que todas las ranuras no se utilizan lo cual aumenta los retrasos en la transmisión.

Estos protocolos también pueden soportar QoS y transmisiones *multicast* y *broadcast*. Los protocolos asíncronos no coordinan el acceso al canal de transmisión y no soportan QoS. Este esquema funciona bien para cargas ligeras de tráfico pero el desempeño decrece cuando estas aumentan debido al incremento en el número de colisiones [18]. Los recursos del medio pueden

asignarse a las terminales usando técnicas como lo son la asignación por tiempo, por espacio geográfico, por frecuencia o mediante combinaciones de algunas de las anteriores. Estas permiten un reparto de los canales inalámbricos aprovechando en la medida de lo posible la utilización de los recursos disponibles en el medio permitiendo a una gran cantidad de usuarios transmitir información sin afectar las transmisiones de otros equipos. Todos los protocolos de acceso al medio propuestos en las redes inalámbricas funcionan con base en estas técnicas, uno de los más conocidos es el de acceso múltiple por detección de portadora con prevención de colisiones '*carrier sensing multiple access collision avoidance*' (CSMA/CA) cuyo mecanismo se utilizó en la construcción del protocolo propuesto en este proyecto. En [15], [8] y [19], se detallan los mecanismos de acceso más utilizados. A continuación se incluye el funcionamiento de algunos de estos.

Acceso múltiple por división de espacio (SDMA)

Divide el espacio geográfico en el que se encuentran los usuarios en espacios más pequeños para asignarlos a distintos usuarios. Esta técnica normalmente se usa en combinación con otras. Una aplicación es la asignación de una estación base a una terminal móvil, esto es, asignar la base correcta a una terminal. Esta técnica de acceso utiliza un ángulo de dirección como otra dimensión en el espacio de la señal el cual puede canalizarse y asignarse a diferentes usuarios, esto se logra mediante el uso de antenas direccionales. SDMA es implementado usando arreglos de antenas en los cuales el intervalo angular de 360° es dividido entre n-sectores. TDMA o FDMA en combinación con SDMA se utilizan para dirigir a los usuarios dentro de un sector específico.

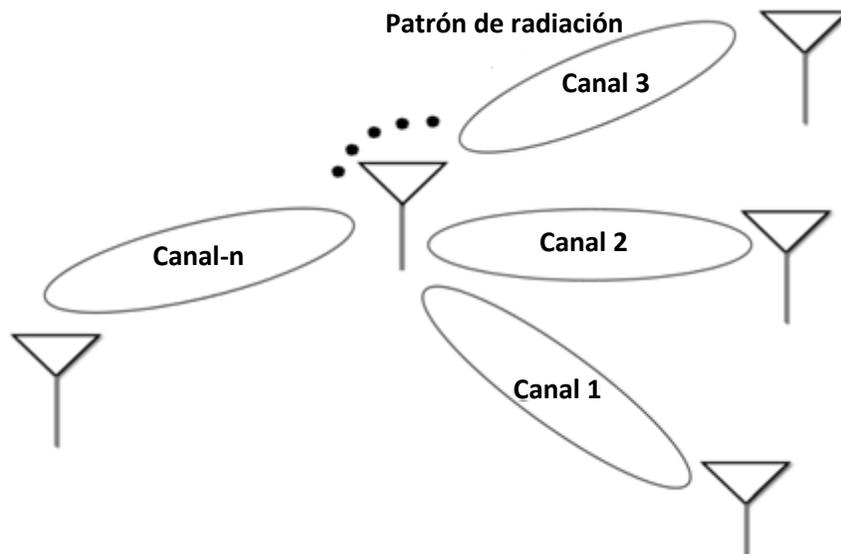


Figura 2.3 Mecanismo de acceso múltiple por división del espacio (SDMA).

Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA)

Comprende las tecnologías para asignar ranuras de tiempo de tal forma que sean usadas por los usuarios para transmitir en el medio. Es necesaria la sincronización entre el emisor y receptor, esta se hace en el dominio del tiempo mediante el uso de patrones como la asignación de ranuras de tiempo para un canal o usando esquemas de asignación dinámica. Esta técnica de acceso es posible cuando la velocidad de transmisión alcanzable por el medio excede la velocidad de las señales digitales a transmitir. Gracias al uso de TDMA, es posible transmitir varias señales digitales o analógicas que transportan datos digitales a través de una única ruta de transmisión mediante la mezcla temporal de partes de cada una de las señales. Los datos se organizan en tramas y cada una contiene un ciclo de ranuras temporales, además, en cada trama se dedican una o más ranuras a cada una de las fuentes. La longitud de la ranura es igual a la longitud de la memoria temporal de transmisión, generalmente de un bit o un carácter. A cada usuario se le asigna un intervalo distinto en función del ciclo de repetición, la repetición cíclica de las ranuras de tiempo implica que ningún usuario realiza transmisiones continuas. Este mecanismo también incluye espacios de guarda para minimizar la interferencia entre los canales.

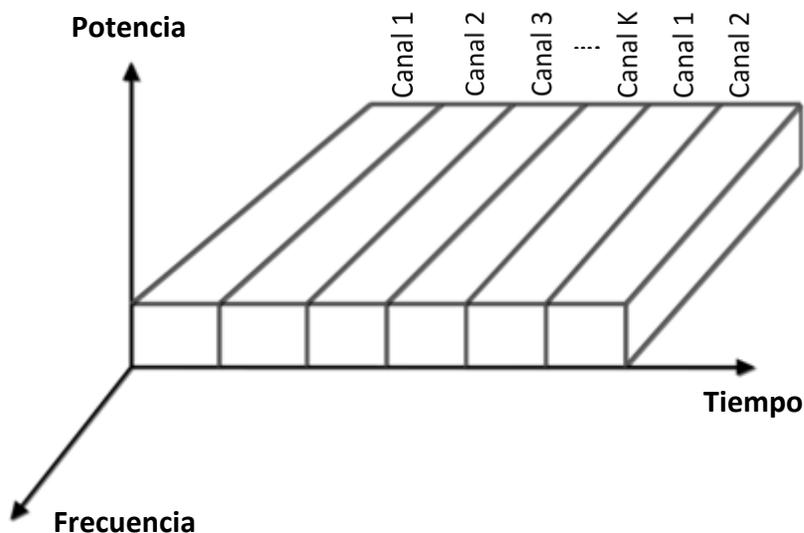


Figura 2.4 Mecanismo de acceso por división de tiempo (TDMA).

TDM fijo

Es el algoritmo más simple de TDM y asigna ranuras de tiempo para canales con un patrón fijo lo cual resulta en un ancho de banda fijo y representa una solución para los problemas de telefonía inalámbrica. Este esquema de acceso es centralizado ya que se cuenta con una estación base que asigna un patrón de acceso a las estaciones, esto hace que el acceso no sea aleatorio y no sea por contención. La diferencia entre TDM y TDMA es que con TDM las señales multiplexadas provienen de un mismo nodo, y en TDMA estas pueden provenir de diferentes fuentes y transmisores. A su vez, TDM implica dividir el ancho de banda del canal que conecta dos nodos en

un conjunto finito de intervalos de tiempo. Por otro lado, TDMA divide el ancho de banda de un canal que es compartido por muchos nodos (normalmente un nodo de infraestructura y varios nodos móviles donde cada uno obtiene acceso a su ranura de tiempo específica).

Aloha clásico

Esta es una técnica en la cual TDM es aplicado sin un mecanismo de control de acceso al medio y no resuelve las contenciones en la capa MAC. En vez de esto, cada estación accede al medio en cualquier momento lo que hace de Aloha clásico un mecanismo de acceso aleatorio debido a que no se cuenta con un coordinador central entre estaciones. Este mecanismo funciona bien para cargas de transferencia ligeras. Se considera que los paquetes de datos llegan al receptor siguiendo una distribución de Poisson.

Aloha Ranurado

Es el primer refinamiento del mecanismo Aloha clásico y consiste en la introducción de ranuras de tiempo, en este caso los emisores se deben sincronizar y las transmisiones solo se realizan al inicio de una ranura de tiempo. Se considera que las ranuras son de tamaño- t equivalente a la longitud de una trama de datos, de esta forma se garantiza que no exista un traslape de los paquetes transmitidos y esto genera un aumento en el rendimiento *throughput*. Específicamente, un paquete que se transmite en el intervalo $[0, t]$ es recibido exitosamente si ningún otro se transmite en ese periodo. Sin embargo, Aloha ranurado requiere sincronización lo cual genera una sobrecarga *overhead* considerable.

Acceso múltiple por detección de portadora (CSMA)

Es otra mejora de Aloha, CSMA realiza un proceso de monitorización de la portadora y accede al medio solamente si está desocupado disminuyendo la probabilidad de una colisión. Uno de los problemas de esta técnica es que no detecta terminales ocultas. Existen distintas versiones de este protocolo.

- **CSMA no persistente:** las estaciones realizan una monitorización de la portadora y comienzan el envío tan pronto se desocupa el medio. De lo contrario, la estación espera una cantidad aleatoria de tiempo antes de ejecutar este proceso nuevamente.
- **CSMA p – persistente:** los nodos también realizan un proceso de monitorización del medio y se considera que tienen una probabilidad p de transmitir información y una probabilidad de $1-p$ de no hacerlo y esperar hasta el comienzo de la próxima ranura.

- **CSMA 1 – persistente:** este método de acceso incorpora un mecanismo llamado algoritmo *backoff*, el cual es sensible al tiempo de espera ayudando a que las terminales esperen para realizar sus transmisiones.
- **CSMA/CA con prevención de colisiones:** el proceso de monitorización de la portadora se combina con un esquema *backoff*. Si el medio está ocupado, espera un intervalo de tiempo para intentar transmitir de nuevo.

Para el desarrollo de la propuesta de acceso al medio diseñada en este proyecto, se integra el funcionamiento del protocolo CSMA/CA para redes inalámbricas cognitivas a fin de obtener una versión capaz de operar en redes con una gran cantidad de dispositivos CR compitiendo por los recursos del medio inalámbrico.

Acceso múltiple por demanda asignada (DAMA)

Realiza la reserva de periodos de tiempo seguidos de un periodo de transmisión. Durante el periodo de reserva las estaciones pueden apartar ranuras de tiempo, sin embargo, es posible que se presenten colisiones en esta etapa. Una ventaja de esto, es que el periodo de transmisión puede realizarse sin que se presente colisión alguna y puede dividirse en etapas con y sin colisiones. A este protocolo se le conoce como Aloha reservado.

Acceso múltiple por reserva de paquetes (PRMA)

En esta técnica se reservan tramas de ranuras. Una estación base hace un *broadcast* a todas las estaciones móviles, de esta manera todas reciben un vector compuesto de ranuras y así conocen cuáles están libres y cuáles reservadas. Cuando las estaciones reciben la trama de ranuras no compiten por aquellas que se encuentran reservadas, lo hacen solo por las que están disponibles llegando a causar colisiones en algunas ocasiones. En caso de que esto suceda, se reenvía la misma trama con las mismas ranuras disponibles que aparecieron la primera ocasión las cuales aún permanecen en este estado debido a que la colisión evitó que fueran ocupadas por una terminal. En caso de que en un determinado instante alguna ranura se desocupe, al reenviarse la trama esta aparecerá disponible y de igual forma se podrá competir por ella.

Reservación TDMA

Bajo este esquema, todas las terminales comparten el mismo canal para la transmisión de sus mensajes. Cuando una terminal tiene datos que transmitir, envía su petición con el tamaño del mensaje a la unidad de reserva la cual es responsable de notificar a la terminal cuándo puede comenzar a transmitir, esto es, que ranuras de datos se pueden utilizar para enviar la información. El proceso de *round robin* permite que varias terminales compartan un mismo canal, gracias a esta

técnica es posible regular intervalos de tiempo en los cuales se transmite información en el canal compartido. Para que la unidad de reserva asigne de una manera adecuada intervalos de tiempo a las terminales, debe tener un conocimiento global de los dispositivos con datos pendientes y sus períodos asignados de transmisión.

Acceso múltiple con prevención de colisiones (MACA)

Un problema importante a ser atendido por los mecanismos de acceso es el de las terminales ocultas, en el caso de los esquemas que disponen de un coordinador central que asignan patrones fijos, este inconveniente es desconocido ya que si la terminal es oculta para la estación base esta no podrá comunicarse de ninguna manera. MACA presenta un esquema que resuelve el problema de las terminales ocultas, no necesita una base central y es un esquema de acceso aleatorio con reservación dinámica. Su funcionamiento es el siguiente.

- El emisor está libre hasta que el usuario solicite la transmisión de paquetes.
- El emisor transmite una solicitud de envío (RTS).
- Si el receptor está libre, al recibir el RTS entonces responde con un mensaje CTS que significa “*listo para recibir*” y espera por el envío de datos.
- El emisor recibe el CTS y comienza la transmisión de datos.

Poleo (Pooling)

El esquema *pooling* se aplica cuando al disponer de un conjunto de terminales es posible que cada una de ellas sea escuchada por todas las demás. Consiste en un esquema centralizado con una estación maestra y muchas estaciones esclavas. La estación maestra puede hacer un poleo a las esclavas basándose en distintos esquemas como *round robin*, aleatorio o de acuerdo a reserva. La estación base mantiene el control absoluto del canal, el contenido de la trama de datos no es fijo lo cual permite que el tamaño de los paquetes a enviar sea variable.

Acceso múltiple por detección de impedimento (ISMA)

Es un servicio usado para la transmisión de paquetes de datos en los servicios de celulares digitales. Se dispone de una estación base la cual indica que el medio no está libre mediante un tono de ocupado en el enlace de bajada. Cuando el tono de ocupado termina, el acceso al enlace de subida ya no es coordinado. La estación base envía un reconocimiento por transmisiones exitosas. Una estación móvil detecta una colisión en caso de que no exista un reconocimiento positivo, en este caso se implementa un mecanismo adicional de *backoff* y de retransmisión. El funcionamiento del protocolo es el siguiente:

- La estación central indica sobre el enlace de bajada si el medio esta libre o no.
- Las terminales no realizan envíos si el medio está ocupado, sin embargo acceden tan pronto como el tono de ocupado finaliza.
- La estación indica una colisión o éxito de transmisión mediante el tono de ocupado o con un reconocimiento (ACK) respectivamente.

Acceso múltiple por división de código (CDMA)

Hace uso de códigos para separar a diferentes usuarios en el espacio de código y permitirles acceder al medio compartido sin interferencias. La señal de diferentes usuarios es modulada con códigos ortogonales y no ortogonales [19][15]. Para diferenciar a distintos usuarios se usan códigos digitales únicos los cuales son conocidos por el emisor y el receptor. Esta técnica hace uso de una tecnología de espectro expandido, de esta forma la información se extiende sobre un ancho de banda mayor al original conteniendo una señal. Posteriormente, la señal ensanchada es transmitida junto con el resto de señales generadas por otros usuarios usando el mismo ancho de banda. Posteriormente, a los datos a transmitir se les aplica un XOR con el código de transmisión del usuario responsable del envío, tal código es único y no se repite en usuarios diferentes. Cuando ésta es recibida, las señales de los distintos usuarios se separa haciendo uso de códigos distintivos. En el CDMA ortogonal (síncrono) cada usuario emplea un código único para modular la señal y los códigos de usuarios localizados en una misma zona son ortogonales. Para CDMA no ortogonal (asíncrono), al ser matemáticamente imposible crear secuencias de codificación que sean ortogonales en todos los instantes aleatorios en que podría llegar la señal, se usan secuencias únicas pseudo-aleatorias también llamadas de pseudo-ruido. Estas son una secuencia binaria que parece aleatoria pero que puede reproducirse de forma determinística si el receptor la necesita.

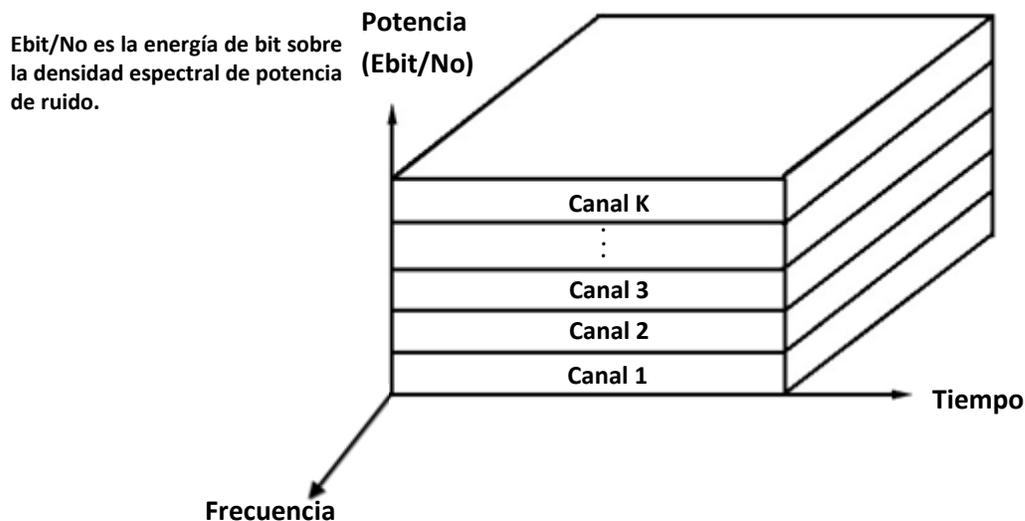


Figura 2.5 Acceso múltiple por división de código (CDMA).

Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA)

FDMA comprende el conjunto de algoritmos para asignar frecuencias a canales de transmisión, dicha asignación puede ser estática o dinámica. En combinación con TDMA, es posible cambiar la frecuencia asignada de acuerdo a ciertos patrones. En esta técnica, la señal se divide en canales que no se superponen asignando uno para cada usuario en distinta frecuencia. Estos canales tienen espacios de guarda para compensar la interferencia de canales adyacentes, de esta forma, FDMA permite la transmisión de varias señales de forma simultánea ya que cada una de ellas se modula con una frecuencia portadora distinta y las frecuencias portadoras están suficientemente separadas para que los anchos de banda no se solapen de forma importante [19][15].

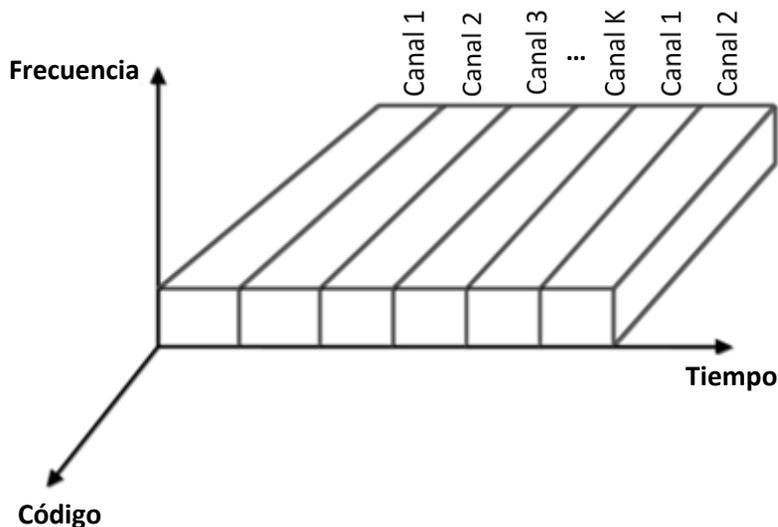


Figura 2.6 Acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA).

Existe una gran variedad de protocolos de acceso al medio propuestos para la redes inalámbricas cognitivas, cada uno de estos tiene características especiales las cuales se relacionan directamente con su funcionamiento y permiten hacer una clasificación de los mismos. Una utilidad de esta clasificación es que al diseñar una nueva propuesta MAC, es posible saber qué aspectos funcionales pueden incluirse en su arquitectura y en qué ambiente pueden funcionar.

Los protocolos para CRN basan su funcionamiento en las técnicas de acceso ya mencionadas. Es importante conocer esto ya que en la construcción del protocolo desarrollado en este proyecto se usan técnicas basadas en los métodos anteriores. En este caso, se incorpora en su diseño el mecanismo del protocolo CSMA/CA para redes cognitivas. El capítulo 3 incluye información referente a la clasificación de los protocolos MAC que se han propuesto por otros autores y cómo realizan sus funciones en las terminales CR.

2.4 Clasificación de los protocolos de acceso al medio

Los protocolos pueden clasificarse de acuerdo a la arquitectura de red para la que están diseñados, dividiéndose en centralizados y distribuidos [20]. También en función de cómo asignan capacidades a los usuarios dividiéndose así en los siguientes tipos [21]:

- **Asignación fija:** cada usuario dispone de su propio canal dedicado obteniendo una calidad de servicio garantizada y estable. Este método puede ser ineficiente en el uso de recursos debido a que existe la probabilidad de que en un momento dado un usuario no esté utilizando su canal.
- **Acceso aleatorio basado en contienda:** cada usuario transmite independientemente de los demás disputándose el acceso a un mismo canal. Este tipo de acceso no proporciona ninguna garantía de calidad de servicio, lo cual se considera inadmisibles para ciertas aplicaciones en tiempo real. Estas técnicas tienen como objetivo asignar canales eficientemente a los usuarios activos.
- **Asignación bajo demanda:** trata de resolver las limitaciones de las dos clasificaciones anteriores adjudicando dinámicamente la capacidad de transmisión en respuesta a las solicitudes de los usuarios.

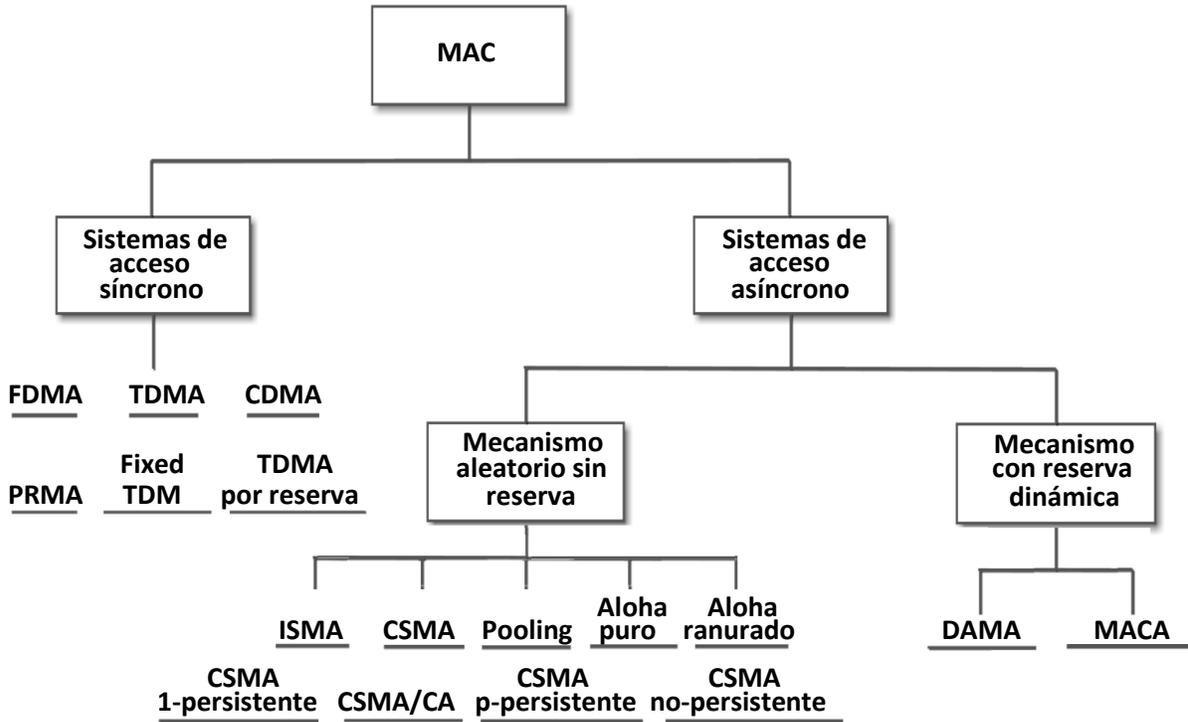
Se consideraron las características más importantes de los protocolos para realizar una clasificación adecuada. En la tabla 2.2 se incluye esta información para cada una de las versiones MAC mencionadas en la sección anterior.

Tabla 2.2 Características de los mecanismos de acceso al medio.

Protocolo de Acceso	Características
SDMA	<ul style="list-style-type: none"> • Divide el espectro en sectores o células. • Solo una terminal puede estar activa en una célula o sector. • La señal se separa mediante el uso de antenas. • Funciona en combinación con TDM o FDM.
FDMA	<ul style="list-style-type: none"> • Segmenta la banda de frecuencias en intervalos disjuntos dando lugar a diferentes sub bandas digitales. • Cada terminal cuenta con su propia frecuencia de forma ininterrumpida. • Usualmente suele combinarse con TDMA y SDMA. • Cuenta con mecanismos de asignación de frecuencias estático y dinámico.
TDMA	<ul style="list-style-type: none"> • Segmenta el tiempo de envío en ranuras de tiempo disjuntas, estas pueden seguir un patrón fijo o generarse bajo demanda. • Todas las terminales están activas por cortos periodos de tiempo de la misma frecuencia. • Cuenta con esquemas dinámicos y estáticos.
CDMA	<ul style="list-style-type: none"> • Propaga el espectro utilizando códigos ortogonales y no ortogonales. • Todas las terminales pueden estar activas en el mismo momento e instante de manera ininterrumpida. • La señal se separa mediante el uso de códigos especiales conocidos por el emisor y el receptor. • Presenta problemas con la adaptación de potencia.

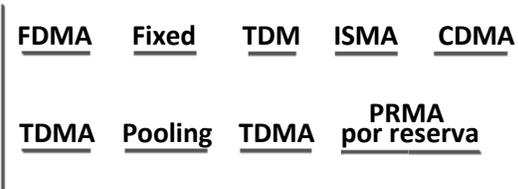
La importancia de realizar esta clasificación y la relación que tiene con este proyecto, es que al disponer de esta información es posible integrar alguno de estos sistemas de funcionamiento en el diseño de la arquitectura de un protocolo de acceso al medio a fin de obtener una propuesta robusta que ofrezca una MAC que tenga un funcionamiento eficiente. La clasificación realizada de los protocolos se muestra en el diagrama de la figura 2.7.

Clasificación por la forma de acceso al medio



Clasificación por arquitectura

Centralizado



Distribuido

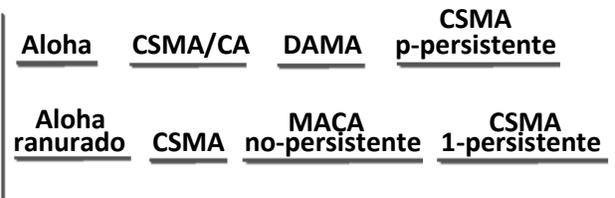


Figura 2.7 Diagrama de clasificación de protocolos de acceso al medio [15][8].

2.5 Redes de radios cognitivos

En la actualidad, en la gran mayoría de países las redes y aplicaciones inalámbricas están reguladas mediante una política de asignación de espectro fija. La asignación de bandas de frecuencia del espectro está regulada por los gobiernos los cuales las administran y asignan a distintas empresas, usuarios y/o servicios mediante permisos o licencias a largo plazo en amplias regiones geográficas. Cada país tiene un cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencia conforme lo acordado en las conferencias mundiales de radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones '*International Telecommunication Union*' (ITU). El espectro es un recurso escaso donde cada vez es más difícil encontrar bandas libres para el despliegue de nuevos sistemas, especialmente en las bandas por debajo de los 3 GHz particularmente valiosas para los sistemas inalámbricos debido a sus características de propagación. Estudios realizados por la Comisión Federal de Comunicaciones '*Federal Communications Commission*' (FCC) de E.U.A han demostrado que gran parte del espectro asignado es utilizado por debajo de las especificaciones para las que fue creado, observándose variaciones temporales y geográficas en su uso con rangos de utilización que van del 15% al 85%. Medidas de utilización de espectro muestran que mientras ciertas partes son altamente utilizadas, otras permanecen prácticamente sin usar. Esto muestra la ineficiencia de las actuales políticas de asignación, debido a esto, diferentes organismos empezaron a considerar la necesidad de introducir reformas para mejorar su uso y disponer de porciones disponibles para nuevas aplicaciones. En la figura 2.8, se muestra la utilización del espectro, puede apreciarse que no se aprovecha por completo y que hay varios espacios libres que pueden ser aprovechados.

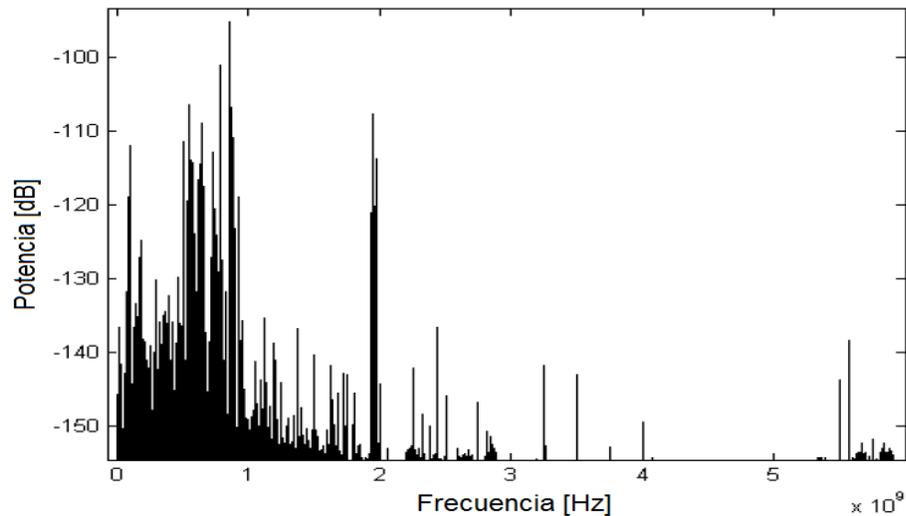


Figura 2.8 Utilización del espectro radioeléctrico [22].

Con el objetivo de hacer un mejor aprovechamiento de estos recursos, se propuso la tecnología de redes cognitivas (redes secundarias) para compartir el espectro de manera oportunista bajo el estándar IEEE 802.22 [22]. Su diseño aún tiene aspectos que mejorar como la construcción de mecanismos más robustos de seguridad y prevención de errores en su comportamiento operacional. En el caso de la seguridad, es necesario diseñar mecanismos para la

prevención de ataques. Si algunos nodos en la red cognitiva tratan de acaparar los recursos del medio, dificultarán la operación de los protocolos MAC debido a que las terminales CR no encontrarán canales disponibles. Esto reducirá la capacidad de transmisión de los usuarios entorpeciendo el funcionamiento de la red por lo que estas terminales deberán ser excluidas. El objetivo de los servicios de seguridad, es proporcionar un entorno que permita la protección de la red contra ataques maliciosos. A los ataques en una red cognitiva se les clasifica como activos y pasivos. Los ataques activos se clasifican en:

- **Mascarada:** tiene lugar cuando una entidad pretende suplantar a otra.
- **Repetición:** significa que una primera entidad pasiva captura la información enviada, realiza cambios no autorizados y la retransmite.
- **Fabricación:** generación y transmisión de mensajes dañinos en la red.
- **Modificación:** cuando una parte del mensaje o el orden en el que se transmiten los datos se modifican o se provocan retrasos en su llegada al receptor.
- **Agujero de gusano:** es la creación de un túnel que se establece a través de un enlace inalámbrico de largo alcance entre dos entidades de la red.
- **Denegación del servicio:** impide el funcionamiento adecuado de un cierto servicio. Este ataque tiene una variante que puede interrumpir parcial o totalmente a la red, ya sea mediante su desactivación o con una sobrecarga de mensajes con el fin de disminuir el rendimiento.

Por último, los ataques pasivos se clasifican en:

- **Escuchar a escondidas:** significa el seguimiento de transmisiones inalámbricas por parte de usuarios ajenos.
- **Agujeros negros:** es la interceptación de los mensajes en el intercambio en la red. Los nodos maliciosos pueden filtrar una parte de los paquetes recibidos, por ejemplo, con el fin de hacer que se apague la red.

Las redes cognitivas trabajan en el nivel más bajo de la pila de protocolos, manejando las frecuencias de emisión y los parámetros de modulación. Gracias a los rápidos avances de la microelectrónica y nanotecnología, es posible incluir una gran capacidad de procesamiento en dispositivos muy pequeños (sistemas embebidos) lo que permite completar componentes de *hardware* con *software* y dotar de “inteligencia” a los receptores. Una de las características más destacadas de las redes de radio cognitivo es la capacidad de cambiar entre las tecnologías de acceso. Esto les permite transmitir en diferentes porciones del espectro radioeléctrico utilizado ranuras de la banda de frecuencia. Este acceso dinámico al espectro es una de las funciones

fundamentales para los transmisores de adaptar en mayor o menor proporción: calidad del canal, congestión de la red, interferencias y las variables de calidad del servicio. Las CRN tendrán que coexistir con las redes primarias que tienen derecho a su porción del espectro y por lo tanto no aceptan interferencia. Se pretende explotar de manera “oportunistas” los espacios disponibles del espectro por medio del conocimiento del medio ambiente y la capacidad de la cognición con el fin de adaptar los parámetros del dispositivo de radio. Las nuevas técnicas de detección del espectro permitirán a las CRN lograr este objetivo. La exploración del espectro radioeléctrico consiste en la búsqueda de huecos/claros ‘*white spaces*’ espectrales en las proximidades de un receptor, esta es una funcionalidad clave para el correcto funcionamiento de los radios cognitivos. Un problema a enfrentar es la gestión de las interferencias causadas a los PU, esto se puede abordar desde dos puntos de vista diferentes: centrada en el receptor o centrada en el transmisor:

- **Centrada en el receptor:** un límite de interferencia en el receptor se calcula y se utiliza para determinar la limitación de la potencia de los transmisores a su alrededor. Este límite de interferencia (temperatura de interferencia) es elegido para ser el peor nivel de interferencia que puede ser aceptado sin perturbar el funcionamiento del receptor más allá de su punto de operación.
- **Centrada en el transmisor:** el transmisor no conoce la temperatura de interferencia, sino que por medio de sensores se trata de detectar el ancho de banda libre. El procedimiento de detección, permite que el transmisor pueda clasificar el estado del canal para decidir si se puede transmitir y con qué cantidad de energía [23].

Las redes cognitivas pueden estar equipadas con estaciones de radio que proporcionen a las terminales conexiones vía un mecanismo de un salto ‘*single-hop*’, además permiten distribuir los recursos del espectro entre los dispositivos CR. La red es heterogénea, es decir, los dispositivos de radio cognitivo disponen de tres tipos distintos de acceso.

- **Acceso a la red cognitiva:** un CR puede acceder a su propia estación base cognitiva en las bandas con y sin licencia. Esto es porque todas las interacciones ocurren dentro de la red cognitiva y su política de reparto del espectro puede ser independiente de la que tiene la red primaria.
- **Acceso modo *ad-hoc*:** los usuarios pueden comunicarse con otros a través de una conexión *ad-hoc* en las bandas del espectro ya sea con y sin licencia.
- **Acceso a la red primaria:** los usuarios acceden a la estación base principal a través de la banda con licencia. A diferencia de otros tipos de acceso, los usuarios de radio cognitivo requieren una adaptación del protocolo MAC que permite la navegación a través de múltiples redes primarias con diferentes tecnologías de acceso [21].

2.6 Radios cognitivos

Son un conjunto de dispositivos para los SU y explotan las técnicas de adaptabilidad del radio para garantizar la no interferencia a los PU. El término radio cognitivo '*cognitive radio*' (CR) fue definido por Joseph Mitola III, el lo describió como un radio que conoce el contexto en el cual se encuentra operando y como resultado de aquello puede adaptar su proceso de funcionamiento como una extensión natural de la radio definida por software. También, se considera que los CR identifican el punto en que los ayudantes personales digitales (PDA) inalámbricos y redes conexas a ellas son lo suficientemente "inteligentes" sobre los recursos de radio relacionados con las comunicaciones entre equipos para detectar las necesidades de comunicación del usuario en función del contexto de uso y proveer los recursos de radio y los servicios inalámbricos más apropiados para esas necesidades [24].

Los CR permiten el soporte de aplicaciones que aumentan las capacidades de optimización y gestión del espectro, interfaz con redes inalámbricas e interfaz con el usuario [25]. La idea es que un dispositivo con tecnología CR pueda reconocer su medio ambiente y utilizar los recursos disponibles en frecuencias y ancho de banda independientemente de la tecnología que ofrezca el servicio [26]. El objetivo principal es que tanto los PU como los SU tengan una disponibilidad efectiva de las bandas de frecuencia evitando interferencias entre sí. De esta forma, los CR pueden compartir el espectro con los PU sin interferirlos y cumplir además con los requisitos de calidad de servicio. El CR realiza las siguientes funciones:

- **Monitorización del espectro:** determina la porción del espectro que se encuentra disponible.
- **Decisión de espectro:** evalúa factores como la tasa de datos, el modo de transmisión y ancho de banda. Finalmente, con esos datos la banda del espectro más apropiada es elegida de acuerdo a las características del espectro y requerimientos del usuario.
- **Compartición del espectro:** coordinar el acceso a este canal con otros usuarios de la red cognitiva.
- **Movilidad del espectro:** desalojo del canal cuando se detecta a un PU manteniendo los mismos requerimientos de comunicación durante la transición a un mejor espacio en el espectro.

A los puntos anteriores en su conjunto, se le conoce como el "*ciclo cognitivo*" y se ilustra en la figura 2.9.

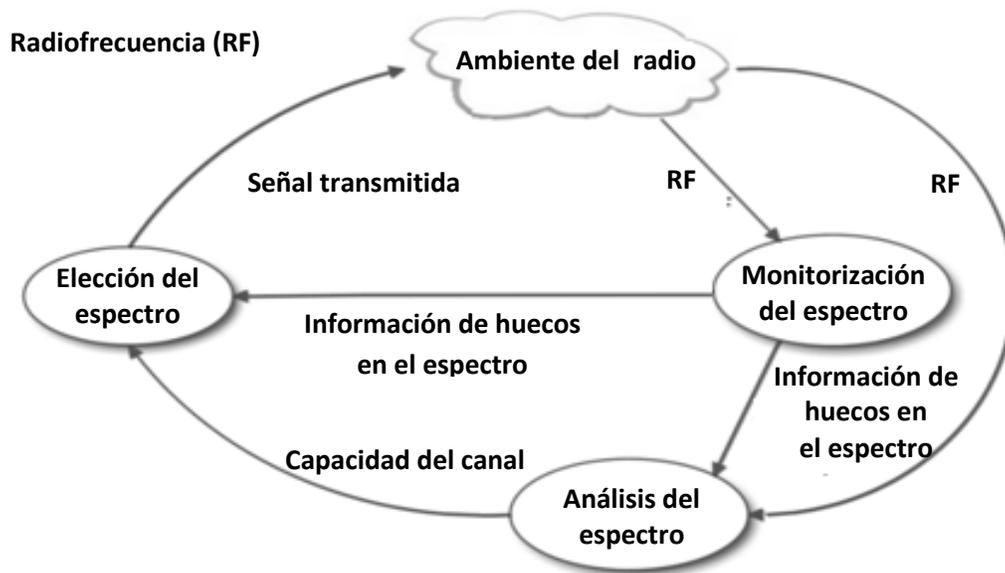


Figura 2.9 Conjunto de etapas del ciclo cognitivo [27].

Con base en lo anterior, dos características principales de un dispositivo de este tipo son la capacidad cognitiva y la auto-reconfiguración o reconfigurabilidad [4][27]. La capacidad cognitiva permite una interacción en tiempo real con su ambiente para determinar los parámetros adecuados de comunicación. De igual manera, se necesitan técnicas más sofisticadas para detectar variaciones temporales y espaciales en el medio ambiente y evitar interferencias con otros usuarios. Esto permite identificar las porciones del espectro que no se están usando y hallar la mejor banda de transmisión del espectro y parámetros de operación posibles. Por otro lado, la reconfigurabilidad es la capacidad de ajustar los parámetros de operación para la transmisión sobre la marcha sin modificación alguna en los componentes de hardware. Esta capacidad le permite al radio cognitivo adaptar fácilmente el ambiente dinámico del radio. Los parámetros de la reconfigurabilidad son los siguientes:

- **Frecuencia de operación:** permite al CR cambiar la frecuencia sobre la que opera.
- **Modulación:** el CR debe reconfigurar el esquema de modulación adaptiva a los requerimientos del usuario y condiciones del canal. El esquema de modulación adaptable permite que una eficiencia espectral más alta sea utilizada.
- **Potencia de transmisión:** permite una configuración de la potencia de transmisión de forma dinámica dentro de los límites de potencia permitidos [28].

En las redes cognitivas, el protocolo MAC juega un papel muy importante ya que permite explotar las oportunidades ofrecidas por el espectro de radiofrecuencia, administrar la interferencia con los PU y coordinar los accesos al espectro entre los SU. En las CRN, el espectro puede dividirse en varios canales los cuales tienen superposición nula o parcial.

Usando canales sin superposición, se puede eliminar la interferencia, sin embargo se gasta más espacio. Utilizando canales con superposición parcial, se mejora la utilización del espectro radioeléctrico y se incrementa el número de canales disponibles. La superposición puede influir en las funciones principales del protocolo MAC como el evitar colisiones de señales entre SU, además de la prevención y control de interferencia para los PU. Un protocolo MAC para redes cognitivas debe evitar colisiones entre SU ya que estas pueden suscitarse si de manera simultánea los usuarios se cambian y usan la misma banda de frecuencia basándose en su proceso de monitorización. Además, debe asegurar la prevención y control de interferencia para los PU, esto implica que los usuarios licenciados puedan compartir con los SU el espectro.

Existen dos modos de compartir el espectro entre los SU y los PU, uno es el modo sobrecapa *'overlay'* y el otro es el modo subyacente *'underlay'*. En el modo sobrecapa, un usuario secundario debe abandonar el canal de transmisión en el instante en que un usuario primario es detectado. En el modo subyacente, un usuario secundario puede seguir transmitiendo en el canal a pesar de la presencia de un usuario primario. Al compartir el medio con los PU existe un nivel de interferencia, sin embargo esta es tolerable por los PU ya que los CR transmiten con un nivel de potencia muy bajo [29]. La mayoría de los protocolos MAC para CR están diseñados en el modo sobrecapa ya que la técnica subyacente suele presentar problemas como control de potencia, asignación de canal y control de admisión a un canal [4].

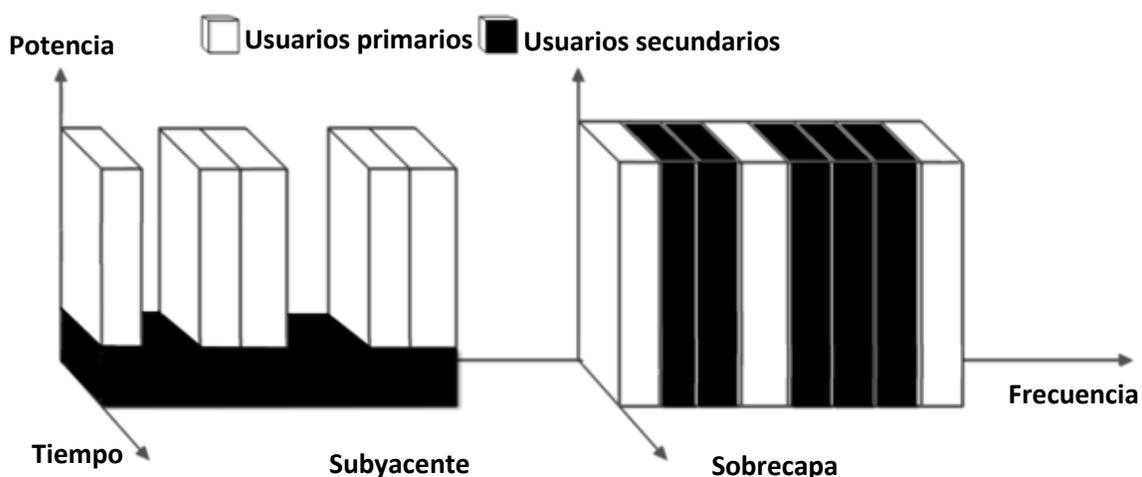


Figura 3.1 Técnicas para compartir el espectro con los usuarios primarios [29].

El protocolo MAC actúa como un puente entre la capa física y la capa de red en las redes cognitivas ya que permite explotar los resultados de la monitorización del espectro de la capa física y determinar el canal e instante específico para acceder. Por otra parte, puede ayudar a la capa de red a decidir la ruta de acceso y la lista de canales disponibles. Por su parte, la capa de red puede ayudar a la capa MAC a elegir canales adecuados que cumplan con el requisito de QoS.

Algunos de los factores a considerar en el desarrollo de un protocolo MAC son: la disponibilidad de los canales y la heterogeneidad, calidad del canal, problema del canal de control común y por último, el problema de las terminales ocultas. Por disponibilidad, se refiere a que se considera que un canal está disponible para un usuario secundario si no está ocupado por un usuario primario o la interferencia entre ellos es mínima. La heterogeneidad de los canales, implica que un usuario secundario cuenta con distintos canales disponibles durante un cierto tiempo. La calidad del canal se refiere a su capacidad de transmisión, la cual varía sobre el tiempo, el espacio y frecuencia. Algunos parámetros importantes a tomar en cuenta son la interferencia, error en los enlaces inalámbricos y tiempo de retención de un canal. Este último, es el tiempo durante el cual se estima que un usuario secundario puede ocupar un canal determinado para transmitir.

El problema del canal de control común se refiere a que los SU en una red cognitiva pueden comunicarse cuando ambos transmiten en el mismo canal. Por esta razón, para establecer el canal de comunicación los dispositivos necesitan realizar un intercambio de mensajes entre sí, sin embargo, este proceso de intercambio debe efectuarse en otro canal común a ambos. Reservar un canal para realizar este acuerdo entre terminales, implica disponer de recursos del medio únicamente para este fin lo cual representa un uso inadecuado de recursos del medio.

Finalmente, el problema de las terminales ocultas se refiere a terminales no visibles o alcanzables para otra terminal que envía información. En este caso, un dispositivo (CR1) es incapaz de detectar al menos a una de las terminales ubicadas dentro de su entorno (llamémosle CR3) ya sea debido a algún obstáculo o a la distancia entre ellos. Al no detectar a CR3 entonces CR1 comienza a transmitir con otra terminal (CR2). Como CR1 no detecta a CR3, asume de forma errónea que puede transmitir sin problema alguno. Sin embargo, si CR3 comienza a transmitir se presentará una colisión con CR1. Esto puede resultar en un considerable de grado del *throughput* afectando aspectos como [4]:

- **Tasa de transferencia promedio:** es la cantidad promedio de paquetes transmitidos por unidad de tiempo.
- **Proporción de sobrecarga:** la relación entre los paquetes de control (RTS/CTS) y los paquetes de datos.
- **Retraso promedio en el canal:** se define como el tiempo medio de permanencia de un paquete de datos en espera a ser enviado. Cuanto más bajo es el tiempo de acceso al canal, mejor es el protocolo.

- **Probabilidad de falla:** la probabilidad de falla tiene diferentes significados en distintos modos de reparto del espectro. En el modo subyacente se define como la probabilidad de que la interferencia de usuarios cognitivos a los PU supere el umbral tolerable. En el modo de sobrecapa, se define como la probabilidad de que los usuarios cognitivos transmiten en un canal mientras el PU regresa.
- **Tiempo promedio de interferencia PU:** representa la duración media cuando un usuario cognitivo transmite en un canal donde hay PU activos causando interferencia con ellos.
- **La eficiencia de utilización del espectro:** se calcula como la razón de la información transmitida con respecto a la cantidad de espectro utilizado.

3.1 Clasificación de protocolos MAC para radios cognitivos

Los protocolos pueden clasificarse basándose en diferentes características, por ejemplo, se puede considerar su modo de acceso al medio el cual puede ser aleatorio, por tiempo ranurado, híbrido (combinación de los dos anteriores) o por el número de transceptores. Los protocolos de acceso aleatorio no requieren de ningún mecanismo de sincronización, están basados en el mecanismo de CSMA/CA. En los protocolos de acceso ranurado, es necesario un mecanismo de sincronización en la red ya que el tiempo es dividido en ranuras para el control de envío de datos. En los protocolos de acceso híbridos se utilizan mecanismos de transmisión ranurada de forma parcial y el control de la transmisión ocurre con una sincronización de las ranuras [28]. En la tabla 3.1, se muestra una clasificación de los protocolos MAC para radios cognitivos tomando en cuenta los puntos anteriores.

Tabla 3.1 Protocolos de acceso al medio para redes cognitivas.

	Arquitectura			
	Distribuida	Centralizada		
Acceso aleatorio	SRAC-MAC [30]		CCC	Subyacente
		CSMA-MAC [31]	Sin CCC	
	HC-MAC [32] DCA-MAC [33] DOSS [34]		CCC	
Acceso ranurado	CREAM-MAC [35]		CCC	Sobrecapa
	C-MAC [36]		Sin CCC	
Acceso híbrido	OS-MAC [37]	DSA-DRIVEN MAC [38] O-MAC [39]	CCC	Sobrecapa
	SYN-MAC [40] POMDP [41] O-CSMA/CA [42]		Sin CCC	

Canal de control común (CCC)

La mayor parte de los protocolos están basados en los principios de técnicas como FDMA, CDMA o TDMA explicados en el capítulo 2 y algunos otros son mejoras de algunas de estas versiones. Dichos protocolos consideraran en su implementación aspectos que representen objetivos a resolver como la disponibilidad, heterogeneidad de canales, calidad del canal, el problema del canal de control común '*common control channel*' (CCC) y el de las terminales ocultas. A continuación se describen algunas de las propuestas contenidas en la tabla.

Protocolo MAC cognitivo para redes inalámbricas multicanal (C-MAC)

Es un protocolo con mecanismos de sincronización y tiempo ranurado. Está enfocado para tener un mejor rendimiento además de hacerlo robusto a cambios en el espectro mediante el uso de múltiples transceptores. C-MAC incluye dos conceptos clave: el canal de encuentro y el canal de copia de seguridad. En C-MAC, cada banda del espectro tiene super-tramas recurrentes compuestas por un período piloto y un período de transferencia de datos. Permite el descubrimiento de vecinos y el intercambio de carga de información de cada banda [36].

MAC sincronizado para redes de radio cognitivas multi-hop (SYN-MAC)

Es un protocolo propuesto por Yogesh R. Kondareddy y Prathima Agrawal del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación de la Universidad de Auburn. Está diseñado para funcionar en redes de saltos múltiples '*multi-hop*'. Esta es una red cooperativa en la cual los usuarios cognitivos se ayudan de los vecinos para el envío de datos a su destino. Se utilizan señales de control para acordar el proceso de comunicación a través de un CCC. Sin embargo, esto genera problemas como la saturación de los canales de transmisión lo cual degrada el rendimiento global de la red. Debido a esto, la propuesta MAC realizada en este proyecto considera evita el uso de un CCC [40].

MAC descentralizado para acceso oportunista al espectro en redes *ad-hoc* (MAC POMDP)

Este protocolo fue desarrollado por Qing Zhao, Lang Tong et al. Permite optimizar el rendimiento de los SU y limita la interferencia con los PU. No usa mensajes de control entre el transmisor y el receptor y asegura saltos síncronos en el espectro cuando se presentan colisiones o se detectan errores [41].

Para construir el MAC propuesto, se considera el conjunto de aspectos más importantes que representen objetivos a resolver o a considerarse en el desarrollo de un protocolo como lo son: la disponibilidad y heterogeneidad de canales, calidad del canal, solución al problema del CCC y el problema de las terminales ocultas y expuestas. En el diseño de la propuesta diseñada, se consideró el esquema sobrecapa como técnica para compartir el espectro radioeléctrico entre los SU. La justificación del uso de esta técnica se debe a que el modo subyacente incluye problemas como control de potencia, asignación de canal y control de admisión a un canal.

3.2 Simuladores de eventos discretos

La simulación es la reproducción del comportamiento dinámico de un sistema real basado en un sistema con el fin de llegar a conclusiones aplicables al mundo real. También permite una experimentación controlada y reducción de tiempos para la obtención de resultados con respecto al sistema real [43]. Para poder detectar aspectos que resulten de utilidad, se realizó la simulación de la propuesta MAC desarrollada en este proyecto empleando una herramienta de simulación implementada en lenguaje Python. Existen programas que permiten la simulación de protocolos, particularmente simuladores de eventos discretos para redes inalámbricas. La simulación permite obtener observaciones sobre los estados del sistema y de esta manera, estimar los parámetros de rendimiento como longitudes medias de las colas de espera o tiempos medios de espera. Es importante disponer de una herramienta de simulación adecuada para redes cognitivas debido a que debe representar el conjunto de aspectos que determinan su comportamiento y de las terminales cognitivas a fin de observar el desempeño de los protocolos de acceso al medio. A continuación se incluyen algunas herramientas diseñadas para simular redes inalámbricas.

Simulador de red (ns-2)

Está escrito en C++ y utiliza un lenguaje de programación llamado OTcl usado para describir escenarios de simulación. También permite programar eventos y configuraciones dinámicas de componentes durante una simulación [44]. En ns2 hay que definir diferentes aspectos como:

- Creación de una topología.
- Creación de un tipo de tráfico existente.
- Programar los movimientos y cambios dentro de la simulación.
- Programar los eventos que se ejecutarán durante la simulación.

Simulador de red de pruebas (NEST)

Esta herramienta cuenta con un entorno gráfico para simulación de protocolos y creación de prototipos de sistemas distribuidos en red. Permite desarrollar modelos de simulación de una red de comunicación mediante un conjunto de herramientas gráficas. También le ofrece al usuario la posibilidad de programar en lenguaje C las funciones de los nodos de la red como el protocolo de enrutamiento y comportamientos de comunicación de enlace como la pérdida de paquetes y las características de retardo [45].

Simulador modular de eventos discretos orientado a objetos en C++ (OMNET++)

Es una plataforma de simulación de redes escrita en lenguaje de programación C++. Su arquitectura está formada por un modulo de acceso al medio llamado "mac.c" y se encarga de procesar y manejar la cola de paquetes pendientes por transmitir. En comparación con otros simuladores su arquitectura es relativamente sencilla. Todas las simulaciones se componen de objetos implementados en C++ llamados '*Simple Module*' que tienen métodos virtuales, privados y protegidos. Sus nodos se componen de una combinación de capas y colas, siguiendo como guía el modelo TCP/IP [46].

Librería de simulación para sistemas móviles de información global (GloMoSim)

Es una plataforma de simulación escrita en lenguaje de programación Visual C++, todos sus nodos siguen el modelo de referencia TCP/IP. Los nodos móviles, poseen un canal inalámbrico modelado con pérdidas de trayectoria y diferentes tipos de propagación. Este canal es manejado por una entidad principal llamada GLOMO, que posee una matriz donde todas las interfaces de los nodos están conectadas. Así se crea un canal compartido con un modelo de propagación y de pérdidas de trayectoria [47].

Herramienta optimizada para la ingeniería de redes (OPNET)

OPNET es capaz de simular una gran variedad de redes y cuenta con opciones como flujos de mensajes de datos, paquetes perdidos, mensajes de flujo de control o caída de los enlaces entre otras, brindando a los desarrolladores una forma efectiva de demostrar el funcionamiento de redes y protocolos. OPNET permite realizar la simulación de nodos con diversas características y la comunicación de los mismos con diferentes tipos de enlace. Es un lenguaje de simulación orientado a las comunicaciones y permite a los programadores acceso directo al código fuente [48].

Simulador de red de la Universidad Nacional Chiao Tung (NCTUns)

Simulador y emulador capaz de representar varios protocolos utilizados en redes IP cableadas e inalámbricas. La tecnología de su núcleo está basada en la metodología de re-entrada de kernel diseñada en la Universidad de Harvard. NCTUNS es un simulador que no requiere procesos adicionales del sistema operativo para implementar un host ó un enrutador virtual. De manera adicional, todos los programas de aplicaciones de la vida real pueden intercambiar paquetes a través de una red simulada por medio de NCTUNS sin necesidad de modificaciones, recompilaciones ó procesos de interconexión adicional [49].

Para evaluar el protocolo MAC diseñado en este proyecto, es necesario emplear un programa de simulación que permita disponer del conjunto de resultados necesarios para conocer su desempeño. A continuación se describen las razones que motivaron la elaboración del programa y su etapa de implementación.

3.3 Justificación de la herramienta de simulación de eventos discretos

Una desventaja de las herramientas de software disponibles, es que no están diseñadas para simular ambientes cognitivos ya que están elaboradas para representar los componentes de las redes inalámbricas primarias. Existe una versión disponible adaptada para las redes cognitivas del simulador ns-2, sin embargo el inconveniente principal que presenta es que el resto de los componentes relacionados con su funcionamiento como algoritmos de encaminamiento o monitorización deben ser programados y esto rebasa en tiempo los alcances y objetivos de este proyecto. Debido a esto, se realizó la implementación de un simulador de eventos discretos que permite hacer la representación de protocolos MAC para redes de radios cognitivas, este programa sólo simula la capa MAC dejando de lado factores que no están directamente relacionados o que influyen en su funcionamiento. Algunos de los aspectos que motivaron el desarrollo de la implementación se resumen en los siguientes puntos.

Al usar una aplicación conocida:

- Hay muchos elementos que no resultan transparentes al momento de realizar las modificaciones necesarias en el código fuente.
- Se invierte mucho tiempo en comprender su funcionamiento para realizar simulaciones exitosas.
- Es necesario realizar ajustes en una gran parte del código para obtener un programa que nos permita cumplir con los objetivos de este proyecto.

Al diseñar una herramienta propia:

- Cada elemento que permite su funcionamiento resulta transparente al programador y al usuario.
- Se dispone de una herramienta de simulación diseñada específicamente para representar el comportamiento de protocolos de acceso al medio en redes cognitivas.
- Se obtiene un programa escalable y robusto que permite la incorporación de nuevas funciones a fin de realizar simulaciones más robustas.

3.4 Diseño de la herramienta de simulación

El programa desarrollado en este proyecto, integra en su arquitectura elementos similares a las herramientas de simulación como las descritas anteriormente. Uno de ellos es la semilla generadora, este es un valor a partir del cual se obtienen de manera aleatoria un conjunto de parámetros que arrojan valores de inicialización con respecto a una distribución específica. La importancia de este valor es que una elección cuidadosa de este, permite mantener una independencia entre los resultados evitando correlación entre ellos.

Para la herramienta diseñada, se utiliza la generación aleatoria de valores para definir el estado inicial de los canales en el medio que serán detectados por los CR. Para representarlos se construye una estructura de tamaño igual a la cantidad de CR totales y en cada entrada hay un número de componentes igual a la cantidad de canales en el medio. Para representar el estado de cada canal se consideran los valores de 0 y 1 [50], estos valores representan que está libre u ocupado por un PU respectivamente y se asignan aleatoriamente. Esto se realiza usando funciones definidas en el lenguaje de programación.

La llegada de los PU se realiza considerando una función que actualiza de forma aleatoria el vector de canales modificando su contenido. A lo largo del proceso de simulación, estos valores van cambiando periódicamente representando la llegada y salida de PU. Un evento se define como un suceso que genera cambios en el estado del sistema, los eventos serán representados como los pares de CR que intentan acceder al medio para comunicarse, este es el conjunto de todos los pares de CR emisor-receptor cada uno de los cuales es construido por el simulador en tiempo de ejecución. Una vez construidos los pares, se les asigna un tiempo de ejecución y se almacenan en una estructura llamada "*agenda de eventos*" la cual es consultada por el motor de simulación para extraer aquellos eventos cuyo tiempo de ejecución asignado coincida con el tiempo de simulación actual y sean procesados.

Para obtener resultados de desempeño de la propuesta desarrollada en este proyecto, la herramienta de simulación construida realiza la implementación del protocolo considerando módulos que ejecutan cada una de sus etapas. Además de esto, debe estar compuesto por todos los elementos necesarios que constituyen la arquitectura de una herramienta de simulación de eventos discretos. Para su implementación se eligió el lenguaje de programación orientado a

objetos de alto nivel Python [51][52], las razones por las que se hizo esta elección es que en comparación de otros lenguajes similares como Java ó C++, Python cuenta con una gran cantidad de funciones que facilitan el manejo de estructuras de datos las cuales permiten entre otras cosas un manejo más eficiente de memoria. Para fines de este proyecto, esto representa muchas ventajas ya que facilita el manejo de los procesos de simulación y del conjunto de resultados obtenidos. Estos últimos se utilizarán para realizar los cálculos con los que será posible conocer el desempeño del protocolo MAC propuesto. Para describir la composición de la herramienta de eventos discretos se explicaran algunos conceptos. Para el funcionamiento del simulador es necesario disponer de un modelo, este es la representación y conjunto de relaciones que explican el comportamiento del sistema, en este caso, es el conjunto de terminales de CR intercambiando información en una red en la cual se compite por los recursos del medio con otros equipos CR y se considera la presencia de PU, de tal forma que lo que se modela es el desempeño del protocolo MAC para hacer posible la comunicación de la terminales CR.

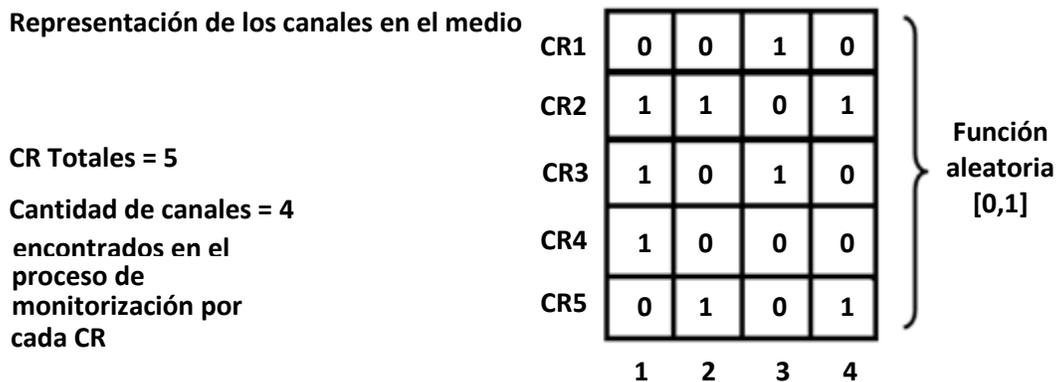


Figura 3.2 Estructura que representa el estado de cuatro canales en el medio inalámbrico.

El manejo del tiempo durante la simulación se realiza con un mecanismo que avanza el reloj global con incrementos de tiempo por evento, esto es, el reloj avanza al tiempo del evento más próximo a ocurrir. Durante la simulación, el programa va obteniendo una serie de resultados que muestran el desempeño del protocolo propuesto. Para esto, se considera también el diseño de una estructura matriz de información que almacena en tiempo de ejecución los resultados de desempeño arrojados, esta información al finalizar la ejecución de un evento será manejada por el “*generador de reportes*”. Este último, es responsable de almacenar el conjunto de datos obtenidos durante el proceso de simulación en archivos de texto. Finalmente, otro componente de la aplicación es la función responsable de obtener gráficas de resultados mostrando la información obtenida. El programa realiza la representación de los CR mediante funciones que se ejecutan en paralelo, esto permite que ambas terminales realicen el proceso de comunicación simultáneamente al igual que las funciones de monitorización del espectro. Las bases de este programa se basan en el trabajo realizado en [53]. Las tareas que permiten generar el intercambio de paquetes de datos entre los CR y el resto de acciones a lo largo de la simulación se realizan por el motor de simulación.

El desarrollo del proceso de simulación de los eventos se realiza de forma ordenada siguiendo cada uno de los siguientes pasos.

- Ingreso de parámetros de inicialización por parte del usuario.
- Se comienza con un ciclo que define el tiempo de simulación global.
- Se crean un conjunto de eventos iniciales.
- Se asigna un tiempo de ejecución a los eventos y se agregan a la agenda de eventos.
- Se revisa si en la agenda existe algún evento a ser procesado para el tiempo de simulación actual, para esto se utiliza una función que recupera de la agenda de eventos aquellos que son procesables y la actualiza agregando eventos que se procesaran en instantes de tiempo futuros.
- Los eventos actuales se almacenan en un arreglo que registra todas las tuplas de los identificadores de radio que forman eventos en ejecución. De acuerdo a la información de los radios dentro de la lista de sesiones, se actualiza la matriz de información llenando los campos correspondientes de información solo de los CR que participan o estarán activos inicializando de esta forma las tramas de estas terminales.
- Para simular un escenario en donde el estado de los canales cambia en el tiempo, se incluye una función que actualiza periódicamente el estado de los canales. Esta realiza cambios de manera aleatoria en su estado siguiendo una distribución uniforme que representa las llegadas de los PU a los canales.
- Una vez definida la matriz que lleva el registro de las tramas de comunicación, se inicia el proceso de comunicación de los radios usando el protocolo MAC.
- Se realiza la ejecución de los eventos de simulación y la información de salida que se genera se va actualizando en la matriz de datos.
- Finalizada la ejecución de un evento, el proceso de monitorización del medio se ejecuta para conocer la disponibilidad de los canales. Este procedimiento es hecho por un método que regresa un vector con la lista de canales que se encuentran disponibles en el momento actual. Esta información es escrita por el *“generador de reportes”* en un archivo de texto generado al final de la simulación.
- El programa dispone de una opción para realizar la gráfica de los resultados contenidos en el archivo de texto de salida. La librería responsable de esta tarea obtiene la información de los archivos generados por el *“generador de reportes”*, la procesa y a partir de esto genera graficas de resultados.

La implementación del simulador está conformada por 19 clases las cuales implementan el conjunto de funciones necesarias para cumplir las funciones del protocolo. Como parte del

proceso de implementación, se realizó la documentación de las diferentes etapas de desarrollo del programa de acuerdo al proceso de ingeniería de software. Entre estas se encuentran los diagramas de secuencia, de clases, documento de visión y de casos de uso entre otros así como los manuales técnico y de usuario. En los apéndices se incluye parte del código fuente que implementa las funciones de la aplicación y algunos de estos archivos y diagramas.

Uno de los factores considerados en la implementación, es el desempeño y velocidad de respuesta de la aplicación. La razón que motiva a atender este aspecto, es que se considera la necesidad de incorporar a futuro más módulos como una segunda etapa en el proceso de mantenimiento y escalabilidad del sistema, de tal manera que el procesamiento de las nuevas funciones no debe afectar la velocidad de respuesta del programa de manera significativa. Para evaluar el desempeño del programa se realizaron una serie de *Profiles*. *Un profile* permite analizar el rendimiento de un programa en tiempo de ejecución, en particular, de la frecuencia y duración de las llamadas a funciones. También proporciona salidas como trazas de ejecución y un resumen estadístico de los eventos observados a partir del análisis de los códigos fuente. Este procedimiento se realizó para todas las clases que integran la aplicación y consto de diversas etapas de prueba que facilitaron la localización de bloques de código que podían optimizarse. Para esto se uso la herramienta *cProfiler* de Python. También se utilizó la librería de Python *epydoc* para generar la documentación necesaria para proyectos utilizando un lenguaje de marcado ligero llamado '*epytext*', esto se hizo como parte del proceso de documentación. De esta forma se genera documentación en formato html y pdf.

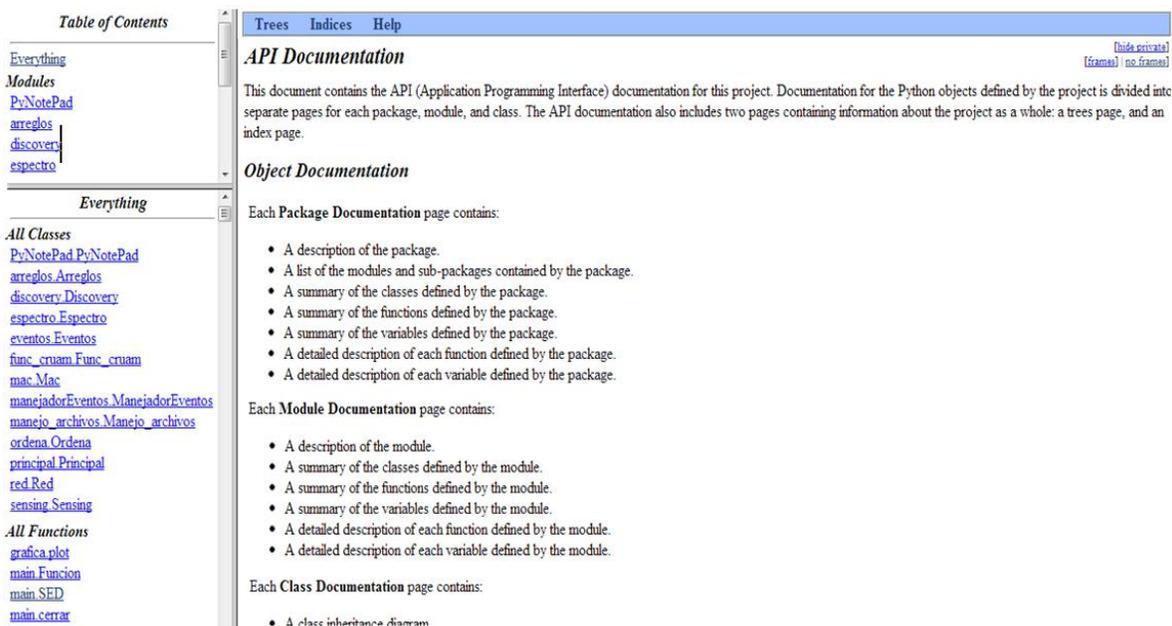


Figura 3.3 Documentación de la aplicación en formato HTML.

Desarrollo de la propuesta

Para diseñar la propuesta MAC partimos de un proyecto originado en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM). A este se le nombró CRUAM-MAC, del acrónimo de Radio Cognitivo Universidad Autónoma Metropolitana-MAC.

Este protocolo de acceso al medio se forma parte de un proyecto de investigación sobre redes inalámbricas de radio cognitivo desarrollado actualmente en esta casa de estudios del cual se han obtenido también otros proyectos de investigación. Del mismo modo, se pretende obtener una MAC que pueda implementarse en un dispositivo de hardware. Esto tiene como objetivo, obtener un prototipo CR funcional capaz de operar en redes inalámbricas que funcionen con la tecnología actual y que sea escalable para incorporar nuevos mecanismos que mejoren su desempeño.

El diseño del protocolo MAC propuesto originalmente, considera su funcionamiento únicamente para coordinar el acceso al medio a un par de CR lo cual lo vuelve poco útil en una red con mas equipos integrándose ya que no se dispone de un mecanismo de coordinación al medio ni asignación de recursos del espectro para más de un par de radios cognitivos. El propósito de este proyecto, es modificar el funcionamiento del protocolo CRUAM-MAC a fin de obtener una nueva versión capaz de trabajar en redes con una gran cantidad de terminales CR compitiendo por acceder al medio. Para lograr este propósito, se incorporo a la propuesta el funcionamiento del protocolo de acceso múltiple con detección de portadora y detección de colisiones sobrecapa '*overlay - carrier sensing multiple access collision avoidance*' (O-CSMA/CA) propuesto en [42] el cual es una versión de CSMA/CA adaptada para redes cognitivas.

4.1 Protocolo de acceso al medio O-CSMA/CA

El funcionamiento del protocolo de acceso al medio diseñado en este proyecto es de acceso aleatorio combinado con las características de las redes cognitivas distribuidas y el estándar IEEE 802.11 para redes LAN inalámbricas. Debido a que los SU dependen de la actividad de los PU para transmitir, su espectro puede variar en el tiempo. El canal disponible puede ser diferente en el radio emisor y el transmisor lo cual vuelve necesario el uso de un canal de control para establecer un canal disponible y común a ambos. Debido a que es un protocolo de acceso aleatorio, se utiliza una trama de intercambio de secuencias (RTS-CTS-DATA-ACK) como se hace en la DCF de IEEE 802.11. Antes de comenzar con el primer paquete la terminal espera que el medio esté libre durante un intervalo DIFS después del cual realiza el envío de la primera trama RTS esperando otro intervalo SIFS en recibir unas trama CTS por parte del receptor. Después de esto, permite que transcurra otro intervalo de tiempo SIFS y realiza el envío de los datos. En el caso de que un PU ocupe el canal durante el proceso de transmisión de los datos, la comunicación se interrumpe y cada CR antes de retransmitir debe asegurarse de que el canal este desocupado por un periodo de DIFS segundos. Transcurrido este tiempo, la estación elige un tiempo adicional de espera llamado

'backoff' el cual se establece de acuerdo a diferentes algoritmos [54] y permite aplazar el intento de transmisión de la terminal. Debido a que el estado del medio percibido por cada una de los CR cambia mucho, es difícil obtener un canal de control (CC), por lo tanto se considera que los nodos adyacentes con un CC se pueden comunicar.

En las redes inalámbricas primarias se utiliza un mecanismo NAV que actúa como un contador decreciente que lleva una cuenta del tiempo que el medio estará ocupado. Este valor está representado como una cantidad de ranuras de tiempo durante las cuales el medio estará ocupado por una trama de intercambio de secuencias '*frame exchange sequences*' FES en progreso. La FES se compone por las secuencia de tramas RTS-CTS-DATA-ACK entre el emisor y receptor a fin de establecer un canal de comunicación, realizar el envío de datos y confirmar la llegada de la información por parte de receptor.

En un entorno donde el espectro cambia mucho, es muy posible que una trama FES termine después de uno o más procesos de monitorización. Debido a esto, en un ambiente cognitivo un proceso de comunicación RTS-CTS-DATA-ACK puede haber pasado por una serie de procesos de monitorización de muchos PU y los recursos del medio pudieron haber cambiado. Debido a estas razones, fue necesario realizar modificaciones en su funcionamiento cambiando el valor de la duración por la longitud de la trama del paquete a transferir, por lo tanto los CR determinan el valor de su NAV de acuerdo a la longitud del paquete. La razón para esto, es que no es posible saber cuántos procedimientos de monitorización tendrán lugar y cuantas veces cambiará la tasa de transmisión hasta que el FES termine.

Además, antes de establecer el valor del vector NAV, se revisa si hay suficiente tiempo antes del próximo proceso de monitorización y antes de realizar el envío del próximo paquete FES. En el sistema del CR, la variable contador decreciente necesita suspenderse en el proceso de monitorización y continua cuando este proceso finaliza. Antes de enviar datos el protocolo debe completar el proceso de *handshaking*. En la siguiente figura, se muestra el proceso efectuado por el protocolo O-CSMA/CA para realizar la comunicación entre dos equipos CR para el caso en el que un PU interrumpe su comunicación y la forma en que realizan un cambio de canal.

Cambio de canal ↴
 Monitoreo (Sc)

O-CSMA/CA

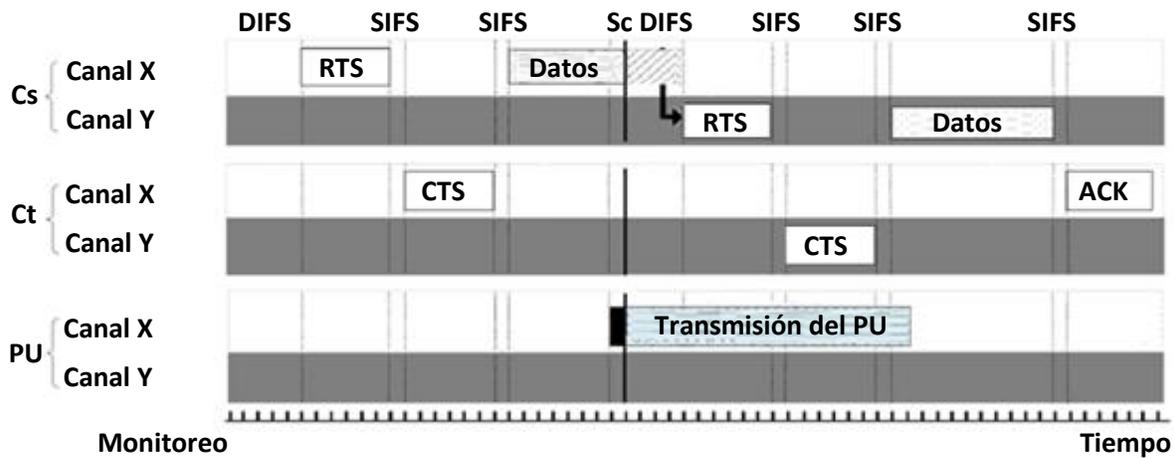


Figura 4.1 Diagrama de tiempos del protocolo de acceso al medio O-CSMA/CA.

4.2 Protocolo de acceso al medio CRUAM-MAC

La propuesta CRUAM-MAC permite asignar de forma dinámica los canales de transmisión del espectro solucionando de esta forma el reparto de recursos a las terminales CR usando un enfoque sobrecapa a fin de no interferir con las transmisiones de los PU. Sin embargo, usa el método subyacente para realizar el proceso de establecimiento del canal de comunicación entre un par de CR. El uso de esta última técnica permite prescindir de un CCC, sin embargo provoca una mínima interferencia en el canal durante el proceso de conexión.

El lapso de interferencia depende del tiempo que tarda en realizar el proceso de monitorización del espectro y el intercambio de mensajes entre un par de terminales para elegir un canal que sea disponible y común a ambas. La función del proceso de monitorización es informar a los dispositivos CR de espacios disponibles en el espectro. Estos son los canales libres de PU lo cual ayuda a identificar posibles canales de comunicación y elegir uno de ellos para transmitir datos entre dos equipos. Una vez que se elige un canal, los CR consideran otros canales libres como posibles canales de respaldo. Si un SU es interrumpido por un PU, el mecanismo de movilidad del protocolo permite a la terminal mudar la transmisión a otro canal de la lista de canales disponibles para continuar la comunicación. Debido a esto, es de gran importancia que la lista de canales disponibles se actualice periódicamente de acuerdo a los cambios de estado en los canales del espectro.

En caso de que deba realizarse un cambio de canal, los dispositivos usan un mensaje de coordinación de 4 bytes para acordar un nuevo canal a fin de continuar con la comunicación. El envío de este mensaje de coordinación se realiza en modo sobrecapa causando una interferencia mínima que equivale en tiempo a los 4 bytes de su tamaño dividido entre el valor de la tasa de transferencia del canal. Este mensaje solo se usa para coordinar el cambio de canal y la sobrecarga "overhead" es despreciable lo cual no afecta el consumo de energía de las terminales.

El protocolo CRUAM-MAC está diseñado considerando el intercambio de tramas FES para resolver el problema de las terminales ocultas y de las terminales expuestas [34]. El dispositivo cognitivo que desea comunicarse, establece una conexión par-a-par “*peer-to-peer*” en el canal disponible usando un identificador de red que es una señal visible que se coloca en un canal donde no hay una comunicación primaria. Este identificador junto con otro identificador de dispositivo es usado por el CR emisor para darse a conocer a la terminal receptora, es decir, con la que pretende establecer la comunicación. De esta forma el receptor al momento de realizar la monitorización del medio, detecta el identificador del CR que pretende establecer comunicación con él.

La principal ventaja de la propuesta CRUAM-MAC es que no se usa un CCC. Dicha ventaja radica en que en un ambiente de radio cognitivo, el espectro cambia frecuentemente y es muy difícil que exista un canal común disponible para ambas terminales. Esto se debe a la constante salida y llegada de terminales primarias lo cual no garantiza la disponibilidad de un canal libre en todo momento para este fin. La propuesta considera también la escalabilidad de la red, como consecuencia, el sistema de funcionamiento del protocolo O-CSMA/CA para redes cognitivas fue incorporado en el diseño del protocolo CRUAM-MAC. El funcionamiento del protocolo CRUAM-MAC es el siguiente:

El funcionamiento del protocolo CRUAM-MAC es el siguiente:

- En cada dispositivo cognitivo, el protocolo mantiene una lista de los canales que encuentra en su entorno, esta información la obtiene de su proceso de monitorización.
- Consideramos al par de CR emisor (Cs) y receptor (Ct). Para el caso del emisor, el protocolo dispone de un contador que permite llevar un conteo de las veces que esta terminal intenta comunicarse con otra, es decir, cuántas veces se ha hecho el intento de encontrar a otra terminal cognitiva. Este mecanismo considera una cantidad predefinida de intentos, después de los cuales, en caso de no detectar a otro CR, da lugar al reinicio del protocolo de acceso.
- De esa lista de canales encontrados, considera sólo aquellos que detecte como disponibles y de entre esos, elige uno y monta una red inalámbrica *ad-hoc* en él para comunicarse con el otro dispositivo CR. Esta red es construida en el canal tanto por el CR receptor y transmisor, cada uno de ellos lo hace con un identificador de red distinto.
- La información del resto de canales disponibles, la mantiene almacenada en una lista como el conjunto de canales de respaldo.
- Ya que el CR emisor y receptor montan una conexión en el mismo canal, es necesario elegir solo una de ellas para que la comunicación tenga lugar. El criterio de elección considerando es seleccionar la red del CR con un id de menor valor, por lo tanto, se hace una comparación de los identificadores de red y la que cumpla con esta condición se conserva.

- Antes de iniciar la transmisión, los dispositivos monitorean el medio para conocer el estado del canal y saber si aún se encuentra disponible. De ser así la comunicación inicia, de lo contrario se elige un canal de respaldo usando el mensaje de coordinación de 4 bytes para que el proceso continúe. Los canales de respaldo son utilizados por el protocolo para cambiar de canal y continuar con la transmisión en caso de que el canal ocupado para transmitir sea usado por un PU. De esta forma, al hacer el cambio de canal se evita reiniciar el proceso de *handshaking* entre ambas terminales agilizando la transmisión de información.
- Una vez que la comunicación se establece en el canal disponible, la interferencia del SU es nula hasta que un PU intenta ocupar el canal. Una vez hecho esto, se realiza el cambio de canal y de inmediato reinicia el envío de información a partir del último paquete de datos que se emitió de forma correcta reenviando el paquete cuya transmisión fue interrumpida por el PU.

En la figura 4.2 se ilustra el procedimiento de comunicación efectuado por 2 CR (Cs y Ct) cuando un PU ocupa el canal usado para la comunicación.

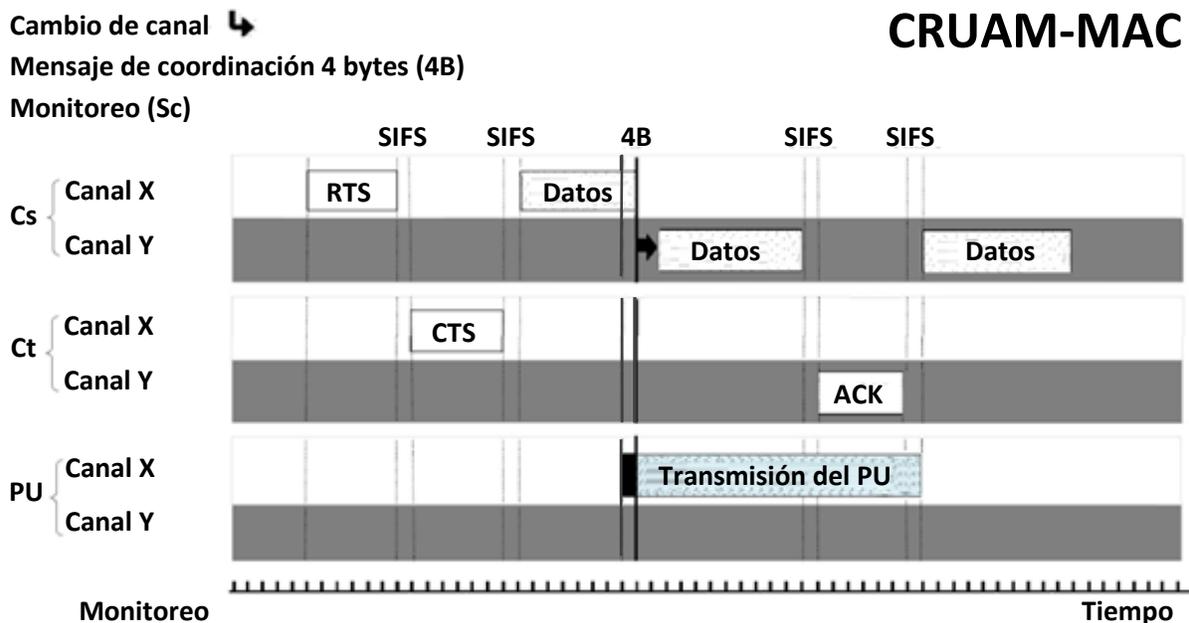


Figura 4.2 Diagrama de tiempos del protocolo de acceso al medio CRUAM-MAC.

De esta forma, se obtiene el protocolo CRUAM-MAC que incorpora el funcionamiento del protocolo O-CSMA/CA el cual hace posible la convivencia de muchas terminales CR compartiendo los recursos del medio obteniendo así una versión que puede trabajar en redes con grandes cantidades de terminales. Las ventajas del protocolo CRUAM-MAC propuesto en este trabajo son:

- Evitar el uso de un canal de control común gracias al intercambio de información entre los CR referente a los canales disponibles detectados en el medio de cada uno de ellos, este proceso se realiza en modo subyacente. De la información compartida, los CR determinan cual canal es común a ambos para establecer el proceso de comunicación.
- Permite montar una conexión sobre un canal disponible y común a ambos equipos, esta conexión consiste en una red *ad-hoc* para que las terminales establezcan el intercambio de información.
- Ofrece una respuesta efectiva por parte de los CR al presentarse la llegada de un usuario primario al canal y se dispone de un vector de canales de respaldo que se actualiza de forma periódica. Esto facilita a las terminales, establecer el cambio de un canal de comunicación y continuar después de un retardo mínimo agilizando la transmisión de información.
- La transferencia de información es más rápida debido a que no se usa el intervalo de espera DIFS usado en CSMA/CA por los dispositivos CR antes de intentar entrar al medio.

En la figura 4.3 se ilustra el diagrama de flujo del protocolo CRUAM-MAC.

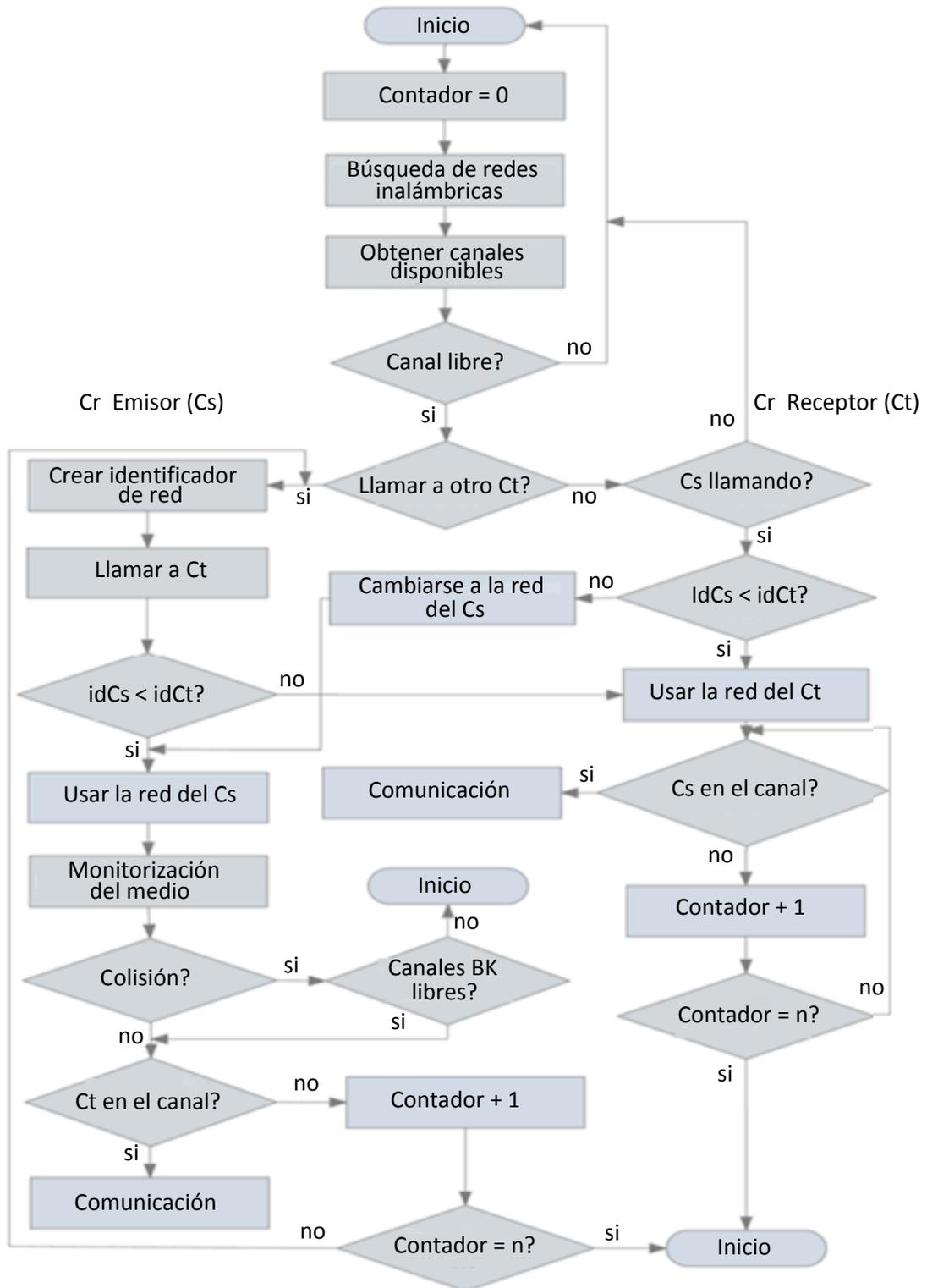


Figura 4.3 Diagrama de flujo del protocolo de acceso al medio CRUAM-MAC.

La trama propuesta para el protocolo CRUAM-MAC se muestra en la siguiente figura seguida de la explicación de cada componente.

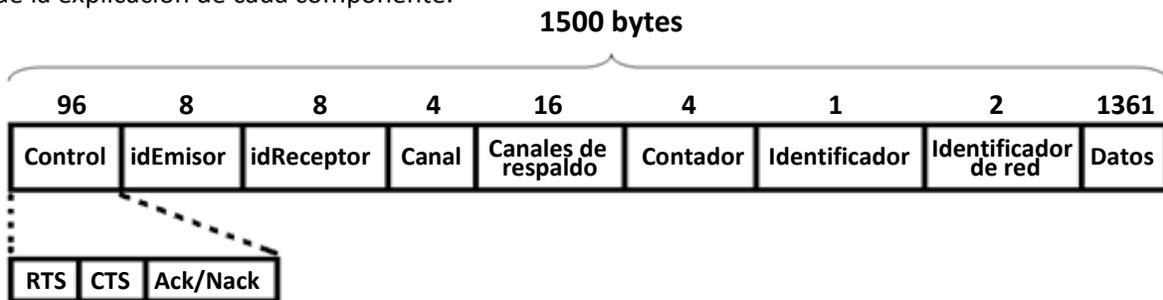


Figura 4.4 Trama de datos del protocolo CRUAM-MAC indicando el tamaño en bytes de cada campo.

- **Control:** incluye la información necesaria para comenzar con el proceso de inicialización conocido como *handshaking* y saber si un paquete de información fue enviado correctamente. Este intercambio está compuesto por las tramas solicitud para envío (RTS), listo para envío (CTS), tramas de confirmación de reconocimiento (ACK) o un aviso que informa al emisor que los datos no se recibieron correctamente (NACK).
- **idEmisor:** identificador del CR que quiere establecer comunicación con otra terminal.
- **idReceptor:** identificador del CR que desempeña el papel de receptor.
- **Canal:** determina el identificador del canal de transmisión sobre el cual el par de terminales CR se pueden comunicar.
- **Respaldo:** contiene información de los identificadores de los canales de respaldo reservados para realizar un posible cambio en caso de que un PU llegue al canal de comunicación actual.
- **Contador:** es usado para llevar un conteo del número de veces en las que una terminal intenta establecer la comunicación con otra. Este número no debe ser mayor a una cantidad predeterminada.
- **Identificador de red:** identifica el proceso de comunicación que se efectúa entre ambas terminales. También es utilizado cuando los dispositivos CR que quieren comunicarse con otro CR, esto se debe a que una señal de comunicación con el identificador del CR emisor y receptor es enviada a través de los canales disponibles hasta que el CR emisor recibe esta señal y responde estableciendo la comunicación sobre el canal. La idea de usar el identificador de red está basada en la tecnología WLAN especificada en el estándar IEEE 802.11 b y g. De hecho es un número de identificación que corresponde a la señal del dispositivo CR que trata de comunicarse, así el dispositivo receptor es capaz de saber mediante el procedimiento de monitorización quien es la terminal que se está tratando de comunicar con él y la lista de canales disponibles para ambos. Gracias al identificador

de red el CR emisor se entera si el dispositivo que se comunica en un canal determinado es un PU o un CR.

- **Cantidad de paquetes:** indica la cantidad de paquetes que han sido enviados de manera correcta por el emisor, esto se realiza llevando la cuenta de los reconocimientos ACK que este recibe por parte del CR receptor debido a un envío exitoso.
- **Datos:** es el campo que contiene la información que se intercambia entre las terminales. La información total a ser enviada se divide en paquetes más pequeños de tamaño fijo. Estos paquetes llevan una secuencia que le permite al receptor saber si se ha recibido la cantidad total de información.

Evaluación de desempeño del protocolo CRUAM-MAC

Para evaluar el desempeño del protocolo se realizaron pruebas considerando distintos parámetros operacionales en la implementación del protocolo como el modo de acceso al medio, la capacidad de compartir recursos con otros dispositivos CR y la manera de evitar interferir con PU. En la sección 5.1 se muestran gráficas de desempeño del protocolo CRUAM-MAC en su versión original para el acceso de dos terminales y posteriormente, los resultados obtenidos al evaluar la versión propuesta que integra el mecanismo de O-CSMA/CA.

5.1 Análisis de desempeño del protocolo CRUAM-MAC sin escalabilidad

Los resultados generados en la simulación se basan en pruebas tomando en cuenta escenarios donde la elección de los canales que se ocupan por PU se realiza de forma aleatoria. Si un par de radios cognitivos se encuentran transmitiendo información y repentinamente un PU ocupa ese canal, los CR deben cambiar el canal sobre el que transmiten a la brevedad utilizando otro que se encuentre libre. Para el caso de un archivo que se transmite entre las terminales, se realiza su división en paquetes más pequeños para llevar un registro y una secuencia de las tramas enviadas correctamente usando el reconocimiento (ACK). De esta forma, si la comunicación de los radios es interrumpida por un PU, los SU pueden continuar la comunicación desde el último paquete del que se recibió una confirmación. Las condiciones en las que realizaron las pruebas de rendimiento del protocolo propuesto se explican a continuación, mostrando los resultados obtenidos en las siguientes graficas. Las pruebas de simulación se realizan con la intención de conocer el comportamiento del protocolo ante la llegada de PU. De esta forma, en los primeros escenarios de prueba se obtendrá el desempeño de la propuesta que no incorpora la escalabilidad y posteriormente para la versión capaz de soportar a más CR compitiendo por los recursos del medio. Para calcular el desempeño del sistema se consideraron los siguientes valores para los parámetros utilizados.

Tabla 5.1 Valor de los parámetros para evaluar el desempeño del protocolo propuesto [55].

Parámetros	Valor
SIFS	15 μ s
DIFS	34 μ s
RTS	44 bytes
CTS	38 bytes
DATA	1024 bytes
Tasa de transferencia	5 Mbps

Los resultados mostrados en la simulación se obtuvieron a partir de un escenario en el que los PU acceden a los canales de forma aleatoria con distribución uniforme. Se considero el uso de la distribución uniforme en la simulación debido a que esta considera que las probabilidades son las mismas para todos los posibles resultados. Desde el punto de vista de las simulaciones y su

aplicación dentro del programa, esta distribución define la llegada de PU a un canal de comunicación interfiriendo las transmisiones de los CR. Esto significa que todos los canales de comunicación tienen la misma probabilidad de ser ocupados por PU lo cual representa escenarios de simulación más realistas. Para el protocolo propuesto CRUAM-MAC, si un par de dispositivos de CR se está comunicando y de repente un PU ocupa este canal, los CR tienen que moverse tan pronto como sea posible a otro canal disponible. Los parámetros de simulación son, 5 Mbps de velocidad de datos para la transmisión de un archivo de 45000 bytes. Este se dividió en 30 paquetes de 1500 bytes para tener un control de los paquetes recibidos correctamente, es decir, conocer el *goodput* el sistema.

Sobre el conjunto de resultados obtenidos mediante el ejercicio de simulación realizado, las estimaciones de la media se reportan con los correspondientes intervalos de confianza de un 95%. Un intervalo de confianza proporciona una medida de la precisión del estimador de la media. Para construir un intervalo, es conveniente recordar que si Z es una variable aleatoria con distribución normal estándar, se satisface:

$$P(-1.96 < Z < 1.96) = 0.95 \quad [\text{ec. 1.1}]$$

Obteniendo de esta forma un intervalo de confianza al 95% para la media μ cuando la variable X es normal y la varianza σ es conocida [56]. Estos valores se obtuvieron del conjunto de muestras obtenidas en las simulaciones y se muestran en las graficas de resultados, el intervalo se define por la ecuación 1.2.

$$\left(\bar{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{1-\alpha/2}, \bar{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} z_{1-\alpha/2} \right) \quad [\text{ec. 1.2}]$$

donde:

- $z_{1-\alpha/2}$ = Cuantíl teórico de la distribución normal estándar que acumula $1-\alpha/2$, para $\alpha = 0.05$, es decir, valor crítico de la normal estándar del 97.5 %.
- σ = Desviación estándar.

A partir de esto se obtiene la siguiente función.

$$\left(\bar{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} 1.96 \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} 1.96 \right) \quad [\text{ec. 1.3}]$$

El protocolo CRUAM-MAC incorpora un mecanismo de canales de respaldo (BK) para cambiar en caso de que se detecte la presencia de un PU.

En la primera prueba de desempeño, se realizó el envío de la información considerando que los canales BK estén disponibles en cualquier momento durante la comunicación. Considerando estos parámetros, el tiempo ideal en el que se transmite este archivo por completo es de 0.07 segundos.

Este valor es posible debido a que no llegan usuarios PU, por lo tanto no se pierde tiempo realizando la conexión en un canal distinto. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.1.

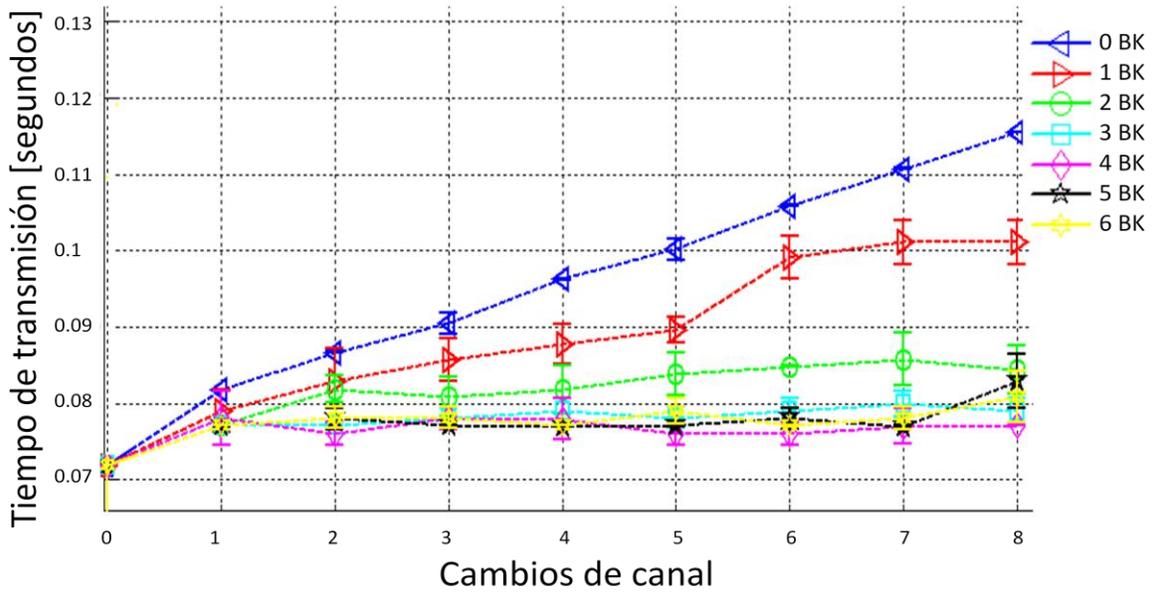


Figura 5.1 Desempeño con cambios de canal y disponibilidad de canales de respaldo garantizada.

Posteriormente, se realizó la misma prueba haciendo una variante en el escenario, en esta ocasión la disponibilidad de canales no era garantizada. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.2.

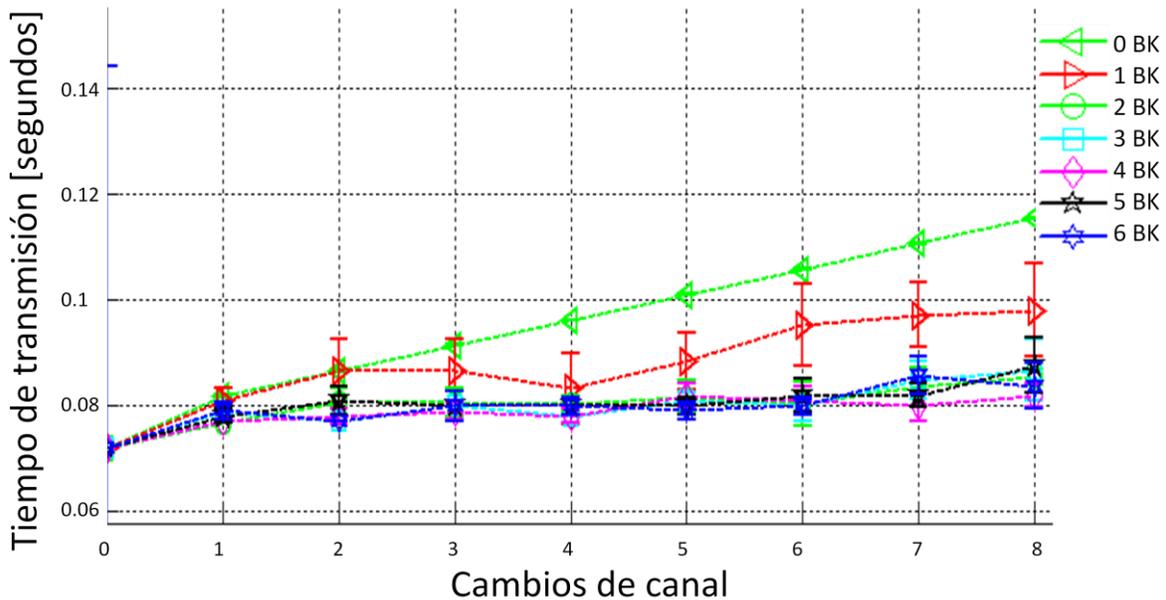


Figura 5.2 Desempeño con cambios de canal y disponibilidad de canales de respaldo no garantizada.

Para el tercer escenario de prueba, se hicieron simulaciones con paquetes de diferentes tamaños: 512, 1000, 1500 y 3000 bytes a fin de determinar el *goodput* del sistema y observar cual tamaño de paquete es el más adecuado para realizar el envío de información. Ver figura 5.3.

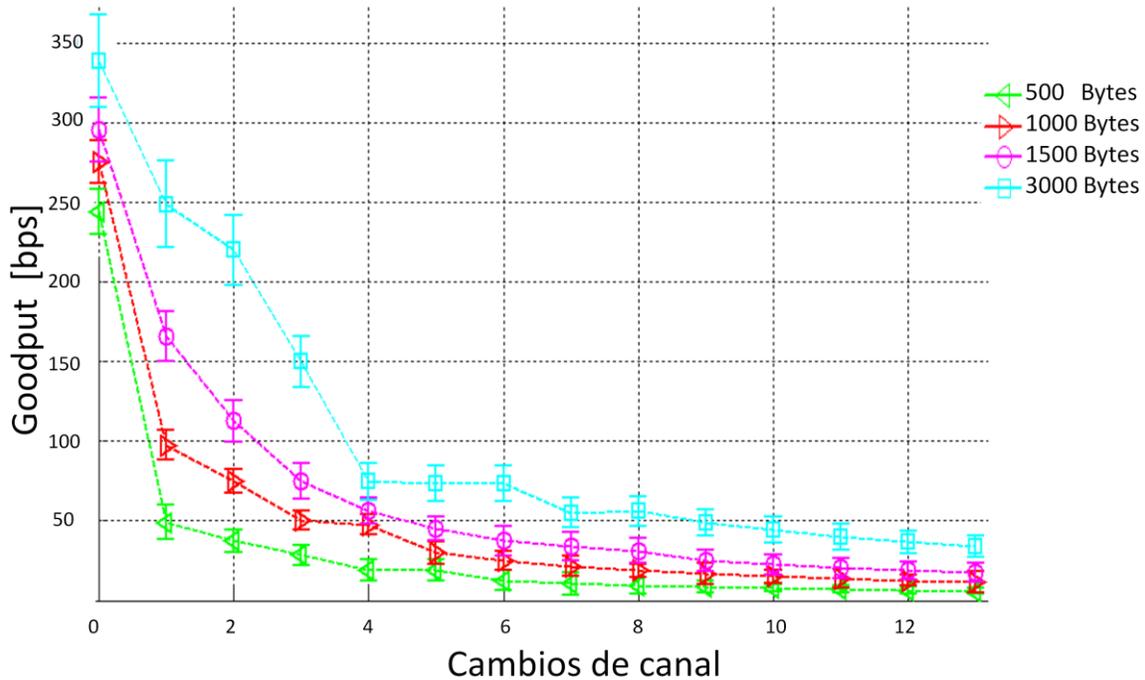


Figura 5.3 Goodput del sistema variando el tamaño de los paquetes.

A pesar de que para paquetes de 3000 bytes de tamaño el intercambio de información es más rápido, en los escenarios de simulación se optó por considerar paquetes de 1500 bytes debido a que en caso de presentarse una colisión, es más costoso en tiempo re-enviar un paquete de 3000 bytes. Además, se optó este valor debido a que de esta manera se realizarán las simulaciones usando un valor para la trama de datos empleado en las implementaciones reales. Este valor equivale a la unidad máxima de transmisión '*maximum transmission unit*' (MTU) que se sugiere por la administración de red. Este valor también se usó en las simulaciones hechas en [42] para el protocolo O-CSMA/CA.

5.2 Análisis de desempeño del protocolo CRUAM-MAC con Escalabilidad

Finalmente, se realizó la simulación de la propuesta del protocolo que incorpora la escalabilidad. Se toman en cuenta 20 CR transmitiendo y se considera que la llegada de las terminales sigue una distribución uniforme y que los dispositivos también realizan el envío de 30 paquetes de 1500 bytes en un canal que transmite datos a una tasa de 5 Mbps. El proceso de comunicación también es evaluado cuando el número de canales de respaldo varía. Además, se considera que la disponibilidad de los canales de respaldo no está garantizada y que en cualquier momento pueden ocuparse por PU. En la figura 5.4 se muestra el tiempo que los CR emplearon en transmitir todos los paquetes de datos de acuerdo al número de cambios de canal requeridos por los CR durante el proceso.

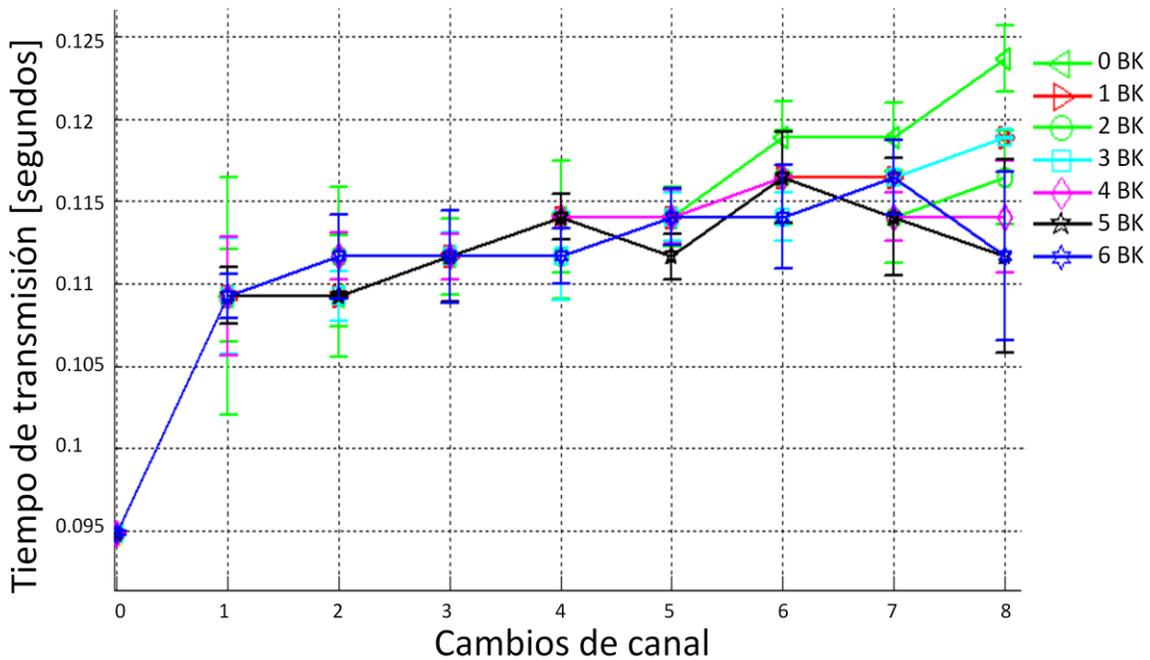


Figura 5.4 Desempeño del sistema con 20 CR presentes considerando hasta seis canales de respaldo.

Después se realizó la comparación de nuestro protocolo CRUAM-MAC contra la propuesta O-CSMA/CA para evaluar el desempeño al transferir un archivo en un ambiente en el que hay PU presentes. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.5, esta nos muestra el tiempo que ambos protocolos tardan en realizar el envío de la información mostrándose una velocidad mayor de transferencia por parte de la propuesta CRUAM-MAC cuando se dispone de hasta cinco canales de respaldo posibles. En este caso, la disponibilidad de canales de respaldo se garantiza.

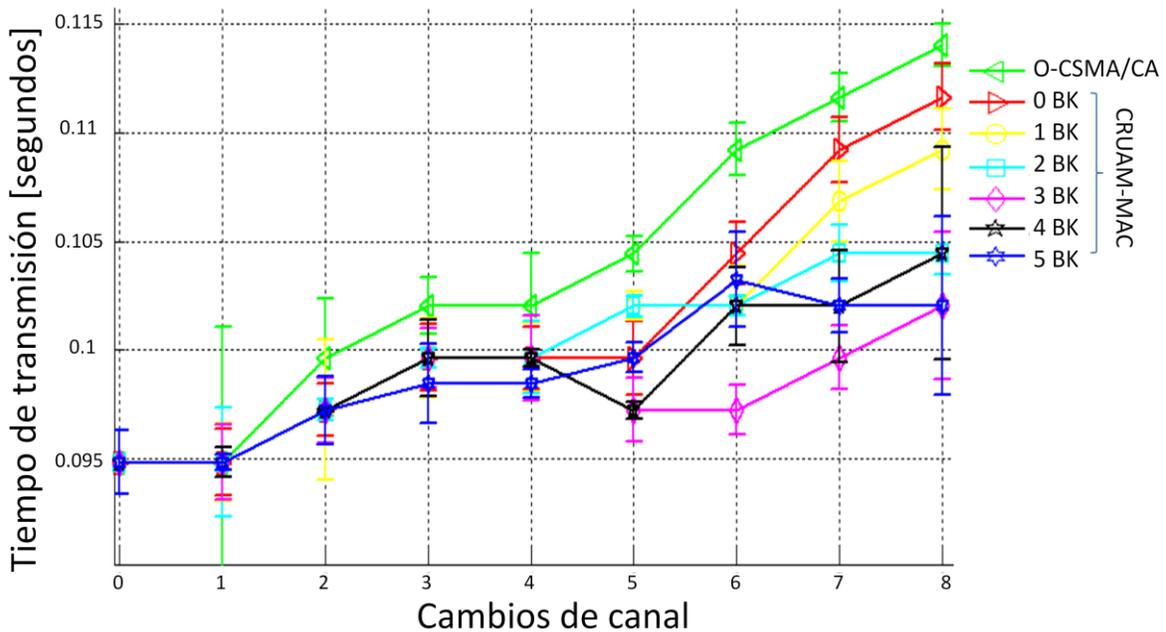


Figura 5.5 Desempeño del sistema con 20 CR comunicándose usando hasta 5 canales de respaldo.

La figura anterior muestra que el protocolo CRUAM-MAC tiene un desempeño similar al de O-CSMA/CA cuando los dispositivos CR compiten entre sí por el medio sin que existan PU presentes. En la figura 5.6 se muestra el desempeño del protocolo para el caso en el que la disponibilidad de canales de respaldo no está garantizada.

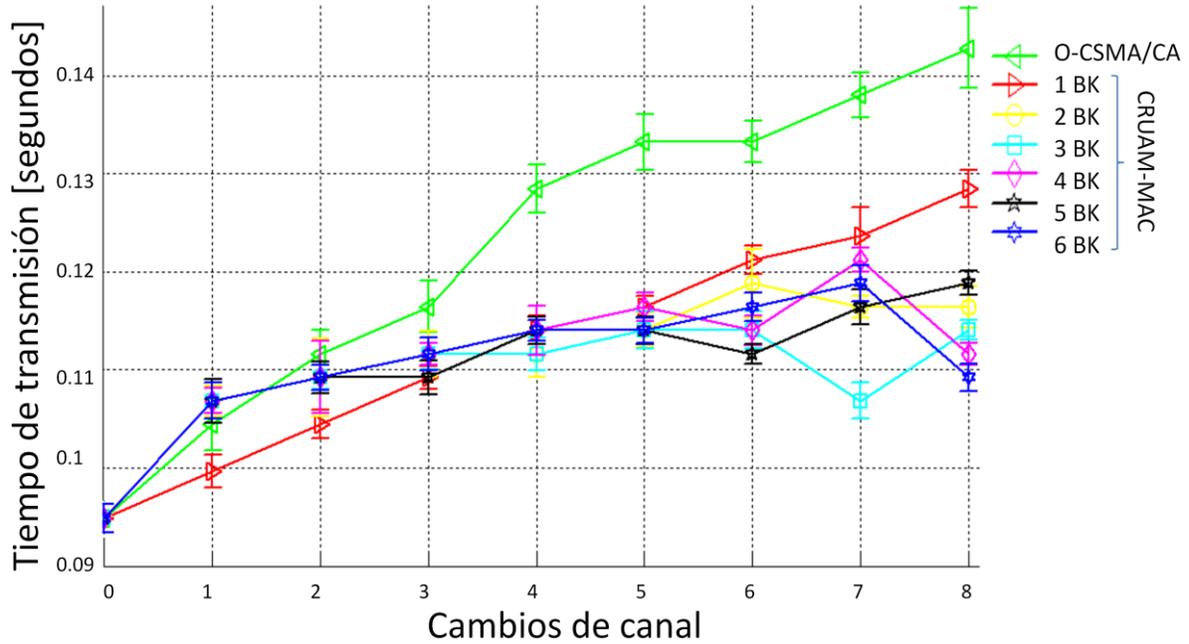


Figura 5.6 Desempeño con cambios de canal y sin disponibilidad garantizada de canales de respaldo.

Finalmente, se compararon las propuestas para conocer su desempeño de acuerdo al *goodput* en la transmisión de un archivo donde los SU compiten por el acceso al medio. La Figura 5.7 muestra los resultados obtenidos observándose que la propuesta CRUAM-MAC mejora el rendimiento obtenido con O-CSMA/CA aunque el CRUAM-MAC funcione sin canales de respaldo.

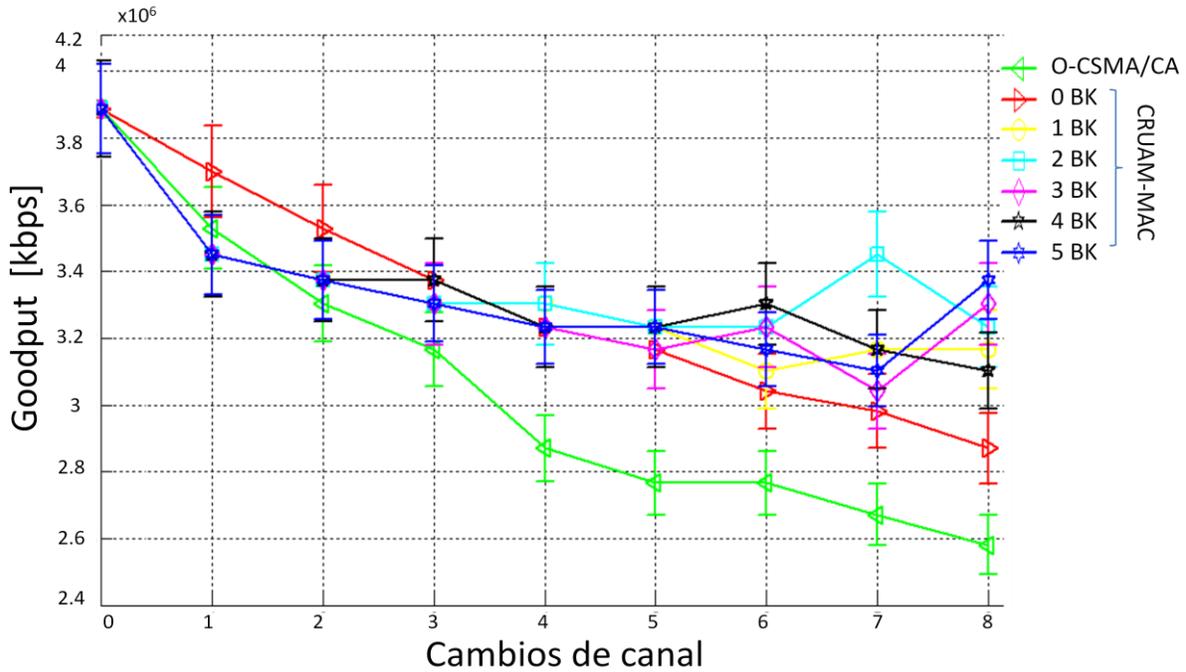


Figura 5.7 *Goodput* del sistema con cambios de canal y PU presentes en el medio.

A pesar de la poca ventaja en tiempo de CRUAM-MAC sobre la propuesta O-CSMA/CA para transmitir toda la información, es importante comentar que el *goodput* mejora considerablemente debido a la inexistencia de interrupciones durante la comunicación de los dispositivos CR.

Conclusiones

Como resultado de este trabajo se obtuvo un protocolo MAC (CRUAM-MAC) para redes inalámbricas cognitivas que proporciona una solución completa para el acceso dinámico al espectro a los dispositivos CR. Este MAC incorpora un mecanismo de control para coordinar el establecimiento de comunicación entre los equipos CR. El desempeño de la propuesta se conoció al evaluar su comportamiento en distintos escenarios de simulación donde se consideraron cambios constantes en el estado del espectro.

Una de las principales ventajas del protocolo propuesto, es que no requiere un canal de control común gracias al uso de un identificador de red que puede ser detectado por otros dispositivos CR a través de su función de monitorización, sin que esto genere un consumo adicional de energía. Además, el protocolo CRUAM-MAC considera un mecanismo para coordinar los movimientos de canal en la presencia de PU, lo que representa una ventaja significativa en tareas de movilidad.

La utilidad del protocolo CRUAM-MAC, depende del intervalo de tiempo de análisis del estado de los canales del medio y del número disponible de canales libres detectados en este proceso. Las simulaciones muestran que el protocolo propuesto CRUAM-MAC, reduce la pérdida de paquetes debido a que la comunicación entre los dispositivos CR no se interrumpe de manera significativa durante los cambios de canal realizados para evitar interferencia con PU. Además, el acceso a un canal de comunicación disponible es más rápido en comparación con el protocolo de acceso O-CSMA/CA.

El protocolo CRUAM-MAC ofrece una solución completa de acceso dinámico al espectro y tiene un esquema que permite resolver los problemas de terminales ocultas y expuestas. También se realizó la implementación de una herramienta de simulación de eventos discretos para redes de radio cognitiva, la cual permitió obtener los resultados de desempeño de la propuesta. Como ventajas de su construcción, se obtuvo un programa hecho específicamente para simular el comportamiento de los protocolos de acceso al medio para redes cognitivas lo que permitió cumplir con los alcances de este proyecto.

Los resultados arrojados por el simulador muestran que el protocolo de acceso al medio CRUAM-MAC mejora considerablemente en el caso de que se dispongan de canales de respaldo. Otra de las mejoras realizadas en la arquitectura del protocolo es que considera un mecanismo para coordinar los cambios de canal debido a la presencia de un PU, esto representa una gran ventaja ya que agiliza la movilidad de los equipos. Debido a que no se usa el intervalo de espera entre tramas DIFS, la transferencia de los paquetes de datos es más rápida. Gracias a esto, la propuesta CRUAM-MAC muestra un mejor desempeño en comparación O-CSMA/CA obteniéndose una mayor velocidad en el acceso al medio inalámbrico y en la transferencia de datos aun si no se dispone de canales de respaldo.

Trabajo futuro

El desarrollo de protocolos de acceso al medio para redes cognitivas junto con el resto de funciones que se ejecutan en las terminales de radio cognitivo, ofrecen un área de oportunidad para desarrollar mejoras en estos sistemas. En lo relacionado con el protocolo propuesto en este trabajo se tiene contemplado adaptar su funcionamiento a fin de que pueda operar en redes inalámbricas regionales.

Con respecto a la herramienta de simulación implementada, se pretende escalar su funcionamiento a fin de obtener una aplicación que permita evaluar el desempeño de funciones como la monitorización o algoritmos de encaminamiento para redes cognitivas y disponer de un ambiente gráfico que permita visualizar la transferencia de paquetes de información en tiempo de simulación.

Referencias

- [1] Cristina Cullell March, La Política del Espectro Radioeléctrico en la Unión Europea: la Armonización del Dividendo Digital en el Reino Unido y España, Tesis doctoral, Facultad de Ciencias de la comunicación, Universidad Internacional de Cataluña, España 2010.
- [2] María Huidobro Manilla, Identificación de white spaces en la Banda de Televisión para la Futura Implementación de Redes de Radio Cognitiva, Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Cataluña, España, 2011.
- [3] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Buran, and S. Mohanty, *A survey on spectrum management in cognitive radio networks*, IEEE Communications Magazine, Vol. 46 Issue 4, pp. 40-48, 2008.
- [4] Jie Xiang, Yan Zhang, *Medium access control protocols in cognitive radio networks*, Wireless Communications and Mobile Computing, pp. 31-49, 2010.
- [5] Adam Engst, Glenn Fleishman, *Introducción a las redes inalámbricas*, Anaya Multimedia, ISBN: 84-415-1561-1.
- [6] Andrés Eduardo Cervantes Rivadeneira, Análisis y diseño de una red comunal multiservicios para brindar acceso a internet a centro educativos y servicios comunitarios para unidades públicas del Cantón Urcuquí de la provincia de Imbabura, Tesis de licenciatura, Escuela politécnica del ejercito, Sangolquí Ecuador, 2009.
- [7] Eduard Deza Castellano, Estudio de aplicaciones de redes de comunicaciones inalámbricas ad-hoc para sistemas a bordo de automóviles, Tesis de licenciatura, Universidad politécnica de Cataluña, Cataluña España, 2007.
- [8] Vijay Garg, *Wireless communications and networking*, Morgan Kaufmann Publishers, ISBN: 978-0-12-373580-5, 2007.
- [9] Monica Paolini, *Wi-Fi WiMAX and 802.20 -The disruptive potential of wireless broadband*, Senza Fili Consulting & BWCS Ltd, www.sensa-fili.com, 2004.
- [10] Matthew S. Gast, *802.11 Wireless networks: the definitive guide*, O'Reilly, 2002, ISBN: 0-596-00183-5.
- [11] Luis Fernando Valle Islas, Coexistencia de redes WLAN & WPAN, Tesis de Licenciatura, Universidad de las Américas, Puebla México, 2005.
- [12] Jordi Chalmeta Ugas, Estudio y análisis de prestaciones de redes móviles Ad-Hoc mediante simulaciones NS-2 para validar modelos analíticos, Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña España, 2009.
- [13] Johann López, José M. Barceló, *Ventajas de usar subredes en una red ad-hoc con nodos móviles*, Proc. of XV Jornadas Telecom i+d 2005. Nov 2005.
- [14] Ian F. Akyildiz, *A Survey on Wireless Mesh Networks*, IEEE Radio Communications, Vol. 47 Issue 9, pp. 23-30 2005.

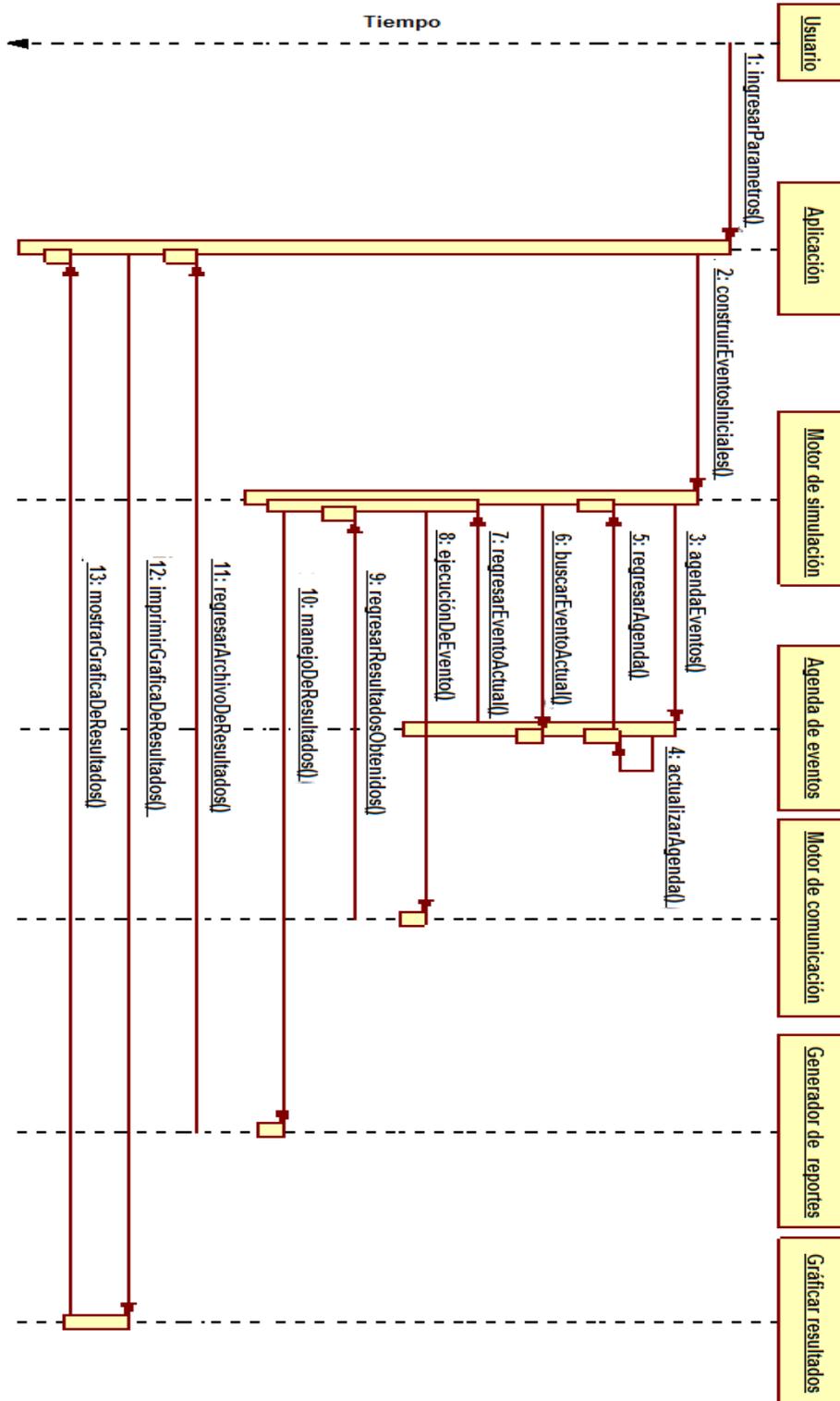
- [15] W. Stallings, *Comunicaciones de redes y computadoras*, Pearson Educación, ISBN: 84-205-4110-9, 2004.
- [16] Agila García Ricardo David, Sánchez Herrera Jimmy Francisco, *Análisis de estándares 802.11e y 802.11n para largas distancias*, Tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Católica de Loja, Ecuador, 2009.
- [17] A. Capone, F. Martignon, and L. Fratta, *Directional MAC and Routing Schemes for Power Controlled Wireless Mesh Networks with Adaptive Antennas*, Elsevier Journal of Ad Hoc Networks, Vol. 6 Issue 6, pp. 936–952, 2008.
- [18] Sylwia Van den Heuvel-Romasko, Chris Blondia, *A survey of MAC protocols for ad-hoc Networks and IEEE 802.11*, www.pats.ua.ac.be/content/publications/2004/Nissi.pdf, 2004.
- [19] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge University Press, ISBN: 0-521-83716-2, 2005.
- [20] Ajay Chandra, V. Gummalla, John O. Limb, *Wireless Medium Access Control Protocols*, IEEE Surveys and tutorials, Vol. 3 Issue 2, pp. 2-15, 2000.
- [21] María Carmen España Boquera, *Servicios Avanzados de Telecomunicación*, DIAZ DE SANTOS, 2003, ISBN: 84-7978-607-8.
- [22] Danijela Cabric, Shridhar Mubaraq Mishra, *A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum*, In Proc. of 14th IST Mobile Wireless Communications Summit, Dresden Germany, 2005.
- [23] K. –C. Chen, Y. –J. Peng, N. Prasad, *Cognitive Radio Network Architecture: Part II – Trusted Network Layer Structure*, Proceedings of the 2nd international conference on Ubiquitous information management and Communication, pp. 120-124, 2008.
- [24] Yogesh R Kondareddy and Prathima Agrawal, *Cognitive Radio Network Setup without a Common Control Channel*, IEEE Military Communications Conference, pp. 1-6, 2008.
- [25] Joseph Mitola III y Gerald Q. Maguirre, *Cognitive radio: making software radios more personal*, IEEE Personal Communications, Vol. 6 Issue 4, pp. 13-18, 1999.
- [26] David Antonio Segura Briones, *Análisis de la factibilidad para la utilización de cognitive radio (radio cognoscitiva) en las radiocomunicaciones necesarias para casos de emergencia en el Ecuador*, Proyecto previo a la titulación de Licenciatura, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador, 2010.
- [27] Ian. F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, *NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey*, Elsevier B.V. Magazine, Vol. 50 Issue 13, pp. 2127-2159, 2006.
- [28] Claudia Cormio, Kaushik R Chowdhury, *A survey on MAC protocols for cognitive radio networks*, Journal Ad Hoc Networks, Vol. 7 Issue 7, pp. 1315-1329, 2009.
- [29] Alexander M. Wyglinski, Maziar Nekovee, *Cognitive radio communications and networks*, Elsevier AP, ISBN: 978-0-12-374715-0, 2010.

- [30] L. Ma, C.-C. Shen, and B. Ryu, *Single-radio adaptive channel algorithm for spectrum agile wireless ad hoc networks*, in IEEE DySPAN, pp. 547-558, 2007.
- [31] S.-Y. Lien, C.-C. Tseng, and K.-C. Chen, *Carrier sensing based multiple access protocols for cognitive radio networks*, in IEEE International Conference on Communications, pp. 3208–3214, 2008.
- [32] J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen, *HC-MAC: a hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 26 Issue 1, pp. 106–117, 2008.
- [33] P. Pawelczak, R. V. Prasad, L. Xia, I. G. M., and M. Niemegeers, *Cognitive radio Emergency networks—requirements and design*, in Proceedings of IEEE DySPAN, pp. 601-606, 2005.
- [34] L. Ma, X. Han, and C.-C. Shen, *Dynamic open spectrum sharing for wireless ad hoc networks*, in Proceedings of IEEE DySPAN, pp. 203-213, 2005.
- [35] H. Su and X. Zhang, *CREAM-MAC: an efficient cognitive radio-enabled multi-channel MAC protocol for wireless networks*, in International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, pp. 1-8, 2008.
- [36] C. Cordeiro and K. Challapali, *C-MAC: a cognitive protocol for multichannel wireless networks*, in 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, pp. 147-157, 2007.
- [37] B. Hamdaoui and K. Shin, *OS-MAC: an efficient MAC protocol for spectrum-agile wireless networks*, in IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 7 Issue 8, pp. 915-930, 2008.
- [38] C. Zou and C. Chigan, *A game theoretic DSA-driven MAC frame work for cognitive radio networks*, in Proceedings of IEEE International Conference on Communications, pp. 4165-4169, 2008.
- [39] H. Su and X. Zhang, *Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisioning over cognitive radio wireless networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 26 Issue 1, pp. 118–129, 2008.
- [40] Y. Kondareddy and P. Agrawal, *Synchronized MAC protocol for multi-hop cognitive radio networks*, in IEEE International Conference on Communications, pp. 3198-3202, 2008.
- [41] Q. Zhao and L. Tong, *Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad-hoc networks: a POMDP framework*, IEEE J. Selected Areas Common., Vol. 25 Issue 3, pp. 589-600, 2007.
- [42] Adamis, A.V. Constantinou, P., *Performance Study of CSMA/CA over Spectrum Pooling Environment for Cognitive Radios*, In Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2007.
- [43] Gabriel A. Waigner, *Introducción a la simulación por eventos discretos*, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires Argentina, 2011.
- [44] The network simulator - ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

- [45] Alexander Dupuy, Jed Schwartz, *NEST: a network simulation and prototyping testbed*, Magazine Communications of the ACM - Special issue on simulation, Vol. 33 Issue 10, 1990.
- [46] OMNET++, <http://www.omnetpp.org/>
- [47] GloMoSim: Global Mobile Information Systems Simulation Library, <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>
- [48] OPNET, http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler.html
- [49] S.Y. Wang, and Y.M. Huang, *NCTUns Distributed Network Emulator*, Internet Journal, Vol. 4, Num. 2, pp. 61-94, Nova Science Publisher (ISSN 1937-3805), 2012.
- [50] Nicolas Bolivar, José L. Marzo, Enrique Rodríguez-Colina, *Distributed Control using Cognitive Pilot Channels in a Centralized Cognitive Radio Network*, IEEE AICT '2010, Proceedings of the Sixth Advanced International Conference on Telecommunications, pp. 30-34, 2010.
- [51] David M. Beazley, *Python Essential Reference*, Pearson Education, ISBN: 97-0-672-32978-4, 2009.
- [52] Dave Kuhlman, *Python book: begining Python Advanced Python and Python Exercises*, <http://www.opensource.org/licenses/mit-license.php>, 2009.
- [53] R. Marcelín-Jiménez and R. Esquivel-Villafaña, *A Flexible Simulator for Distributed algorithms*, in Fourth Mexican International Conference on Computer Science, pp. 176-181, 2003.
- [54] Ganchev, A., *Performance evaluation of backoff algorithms for medium access in wireless networks*, Mobile and Wireless Networking (iCOST), International Conference on Selected Topics in, pp. 36-41, 2011.
- [55] Cuina Zhao, Jing Hu, *A MAC protocol of cognitive networks based on IEEE 802.11*, Communication Technology (ICCT), 2010 12th IEEE International Conference on, pp. 1133 – 1136, 2010.
- [56] Sheldon M. Ross, *Introduction to probability models*, Elsevier, ISBN: 978-0-12-373635-2, 2007.

Apéndice

Diagrama de secuencia que describe el funcionamiento del programa de simulación de eventos discretos. El diagrama ilustra la secuencia de pasos realizada por la herramienta de simulación en tiempo de ejecución.



Código del proceso de *handshaking* entre las terminales de CR para establecer un canal de comunicación común de acuerdo al protocolo CRUAM-MAC.

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf8 -*-

import time
from sensing import *
import random
sen = Sensing()

"""Esta clase contiene el metodo responsable de realizar la implementacion del proceso de 'hanshaking' entre las terminales CR
para establecer un canal de comunicacion """

class Handshaking:

    def __init__(self):
        self.hanshaking = hanshaking

    def handshaking(self,matrizTramas,espectro,sesiones,CW,tiempo,vecinos):
        for sesion in sesiones:
            paso = matrizTramas[sesion[0]-1][24]
            leer_edo_canal = []
            if paso != 0:
                source= sesion[0]
                target= sesion[1]
                leer_edo_canal = []
                radiosST = [source,target]
                tramaS = matrizTramas[source-1]
                tramaT = matrizTramas[target-1]
                canal = tramaS[5]
                leer_edo_canal = []
                leer_edo_canal.append(sen.sensaMedio(espectro,source,target,vecinos,canal))
                leer_edo_canal.append(sen.sensaMedio(espectro,source,target,vecinos,canal))
                if 1 not in leer_edo_canal :
                    if paso == 1:
                        tramaS[16] = tramaS[16]+1 #aumenta cantidad de RTS
                        tramaT[16] = tramaT[16]+1 #en las terminales de CR
                        tramaS[0] = 1 #se envia un RTS
                        tramaT[0] = 1
                        tramaS[24] = 2
                        tramaT[24] = 2

                    if paso == 2:
                        tramaS[14] = tramaS[14]+1 #aumenta la cantidad de SIFS
                        tramaT[14] = tramaT[14]+1
                        tramaS[17] = tramaS[17]+1 #aumenta cantidad de CTS
                        tramaT[17] = tramaT[17]+1
                        tramaS[1] = 1 #contesta con un CTS y
                        tramaT[1] = 1 #actualiza la sesiones de los CR
                        tramaS[24] = 3
                        tramaT[24] = 3
```

```

if paso == 3:
    """ ----- LECTURA DEL CTS POR EL EMISOR Y SALIDA DEL HANDSHAKING ----- """
    tramaS[0] = 0 #limpia de registros
    tramaT[0] = 0 #limpia de registros
    tramaS[1] = 0 #limpia de registros
    tramaT[1] = 0 #limpia de registros
    tramaS[9] = 1 #ocupa el canal de datos
    tramaT[9] = 1 #ocupa el canal de datos
    tramaS[24] = 0
    tramaT[24] = 0
    #bandera que inicia el motor de comunicacion
    tramaS[19] = 1
    tramaT[19] = 1
    if source == 1:
        espectro[source-1][canal-1] = -11 #se ocupa el canal de comunicacion
    else:
        espectro[source-1][canal-1] = source
    if target == 1:
        espectro[target-1][canal-1] = -11 #se ocupa el canal de comunicacion
    else:
        espectro[target-1][canal-1] = target
    matrizTramas[sesion[0]-1] = tramaS
    matrizTramas[sesion[1]-1] = tramaT
else:
    #limpia de registros
    tramaS[2] = 0
    tramaT[2] = 0
    tramaS[5] = 0
    tramaT[5] = 0
    tramaS[11] = 0
    tramaT[11] = 0
    tramaS[12] = 0
    tramaT[12] = 0
    tramaS[13] = 0
    tramaT[13] = 0
    tramaS[19] = 1
    tramaT[19] = 1
    tramaS[24] = 0
    tramaT[24] = 0

return [matrizTramas,espectro]

```

Desarrollo del motor de comunicación, consiste en el conjunto de funciones que permiten la transmisión de información entre terminales CR siguiendo el mecanismo establecido en el protocolo de acceso al medio propuesto CRUAM-MAC.

```
#!/usr/bin/env python
# encoding: utf-8

import time
import sys
from sensing import *
from handshaking import *
from func_cruam import *
from eventos import *
from red import *

sen = Sensing()
fca = Func_cruam()
ptr = Red()

"""Esta clase incluye la implementacion de los modulos que le dan forma al protocolo de acceso el medio, esta formada del
conjunto de pasos que integran las diferentes etapas que se desarrollan en las terminales a lo largo del proceso de acceso al
medio"""

class Cruam:

    def _init_(self, mac):
        this.mac=mac

    """Este bloque realiza la implementacion del protocolo de acceso al medio, recibe toda la matriz de tramas como parametro"""
    """para coordinar la informacion de los CR Desarrollo del protocolo CRUAM-MAC, primer estado del ciclo """

    def cruam(self,vecinos,espectro,matrixTramas,sesiones,cantBK,ocupados,tamPaq,CW,n):
        for sesion in sesiones:
            tramaSource = matrizTramas[sesion[0]-1] #trama del CR emisor
            paso = tramaSource[13] #paso del MAC
            if paso != -1:
                canal = matrizTramas[sesion[0]-1][5] #identificador (ID) del canal
                source = matrizTramas[sesion[0]-1][3] #ID del CR emisor(source)
                target = matrizTramas[sesion[1]-1][3] #ID del CR receptor (target)
                tramaTarget = matrizTramas[sesion[1]-1] #trama del CR receptor
                radiosST = [source,target] #identificadores de los CR
                leer_edo_canal = [] #almacena el resultado de la monitorización del medio

            if canal != 0:
                if paso == 0:
                    tramaSource[22] = tramaSource[22]+1
                    tramaSource[8] = random.uniform(1,20)
                    tramaTarget[22] = tramaTarget[22]+1
                    tramaTarget[8] = random.uniform(1,20)
                    tramaSource[13] = 1
                    tramaTarget[13] = 1
```

```

matrizTramas[source-1] = tramaSource
matrizTramas[target-1] = tramaTarget
#se determina si el canal esta libre
if paso == 1:
    if tramaTarget[8] < tramaSource[8]:
        tramaSource[8] = tramaTarget[8]
    if tramaTarget[8] > tramaSource[8]:
        tramaTarget[8] = tramaSource[8]
    if tramaTarget[8]== tramaSource[8]:
        tramaSource[8] = tramaTarget[8]
    leer_edo_canal = []
    leer_edo_canal.append(sen.sensaMedio(espectro,source,target,vecinos,canal))
    leer_edo_canal.append(sen.sensaMedio(espectro,source,target,vecinos,canal))

if 1 not in leer_edo_canal:
    tramaSource[13] = -1
    tramaTarget[13] = -1
    tramaSource[24] = 1
    tramaTarget[24] = 1
    matrizTramas[source-1] = tramaSource
    matrizTramas[target-1] = tramaTarget
else:
    if cantBK >0:
        if tramaSource[6] != [] and tramaTarget[6] != []:
            #se elije un nuevo canal comun de comunicacion
            canal_bk = []
            canal_bk = ptr.elijeCanalcomun(tramaSource[6],tramaTarget[6])
            if canal_bk[0] != 0:
                tramaSource[5] = canal_bk[0]
                tramaTarget[5] = canal_bk[0]
                #actualizacion de canales de respaldo
                tramaSource[6] = canal_bk[1]
                tramaTarget[6] = canal_bk[2]
                #mensaje de coordinacion de 4 bytes
                tramaSource[27] = tramaSource[27]+1
                tramaTarget[27] = tramaTarget[27]+1
                tramaSource[13] = -1
                tramaTarget[13] = -1
                tramaSource[24] = 1
                tramaTarget[24] = 1
                matrizTramas[source-1] = tramaSource
                matrizTramas[target-1] = tramaTarget
            else:
                tramaSource[25] = 3 # NAV
                tramaTarget[25] = 3
                tramaSource[13] = 2
                tramaTarget[13] = 2
                matrizTramas[source-1] = tramaSource
                matrizTramas[target-1] = tramaTarget
        else:
            tramaSource[25] = 3 #NAV
            tramaTarget[25] = 3
            tramaSource[13] = 2

```

```

        tramaTarget[13] = 2
        matrizTramas[source-1] = tramaSource
        matrizTramas[target-1] = tramaTarget

    if paso == 2:
        leer_edo_canal.append(sen.sensaMedio(espectro,source,target,vecinos,canal))
        leer_edo_canal.append(sen.sensaMedio(espectro,source,target,vecinos,canal))
        if leer_edo_canal != [0,0]:
            tramaSource[25] = tramaSource[25]-1
            tramaTarget[25] = tramaTarget[25]-1
        else:
            tramaSource[13] = 3 #avanza al paso backoff
            tramaTarget[13] = 3 #avanza al paso backoff
            limite = random.randrange(1,tramaSource[21])
            tramaSource[18] = limite
            tramaTarget[18] = limite
            matrizTramas[source-1] = tramaSource
            matrizTramas[target-1] = tramaTarget

    #periodo de retraso de transmision
    if paso == 3:
        ocupado = []
        leer_edo_canal = []
        if tramaSource[18] != 0 or tramaTarget[18] != 0:
            leer_edo_canal.append(sen.sensaMedio(espectro,source,target,vecinos,canal))
            leer_edo_canal.append(sen.sensaMedio(espectro,source,target,vecinos,canal))
            if leer_edo_canal[0] == 0:
                if tramaSource[18] > 0:
                    tramaSource[18] = tramaSource[18] -1
            if leer_edo_canal[1] == 0:
                if tramaTarget[18] > 0:
                    tramaTarget[18] = tramaTarget[18] -1
        else:
            tramaSource[24] = 1
            tramaTarget[24] = 1
            tramaSource[13] = -1
            tramaTarget[13] = -1

        matrizTramas[source-1] = tramaSource
        matrizTramas[target-1] = tramaTarget

    return [matrizTramas,ocupados,espectro]

```


Aplicación responsable de realizar la ejecución de la herramienta de simulación. Realiza las llamadas a funciones que permiten la interacción de los métodos de las diferentes clases para la generación, diseño y ejecución de los escenarios de simulación.

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf8 -*-

import time
import sys
import random
import os
import cProfile
import math

""" librerias del simulador """
from discovery import *
from eventos import *
from mac import *
from manejadorEventos import *
from arreglos import *
from handshaking import *
from motor_comunicacion import *
from cruam import *
from ordena import *

""" constructores para el llamado de las funciones de las clases """
class Principal:

    def __init__(self):
        self.principal = principal

    def principal(self,ejeX,ejeY,rango_mon,cant_CR,cantCan,bytestot,capTrans,canResp,intCom,simboloCRC,codeCRC,tamaPak):
        dis = Discovery()
        evn = Eventos()
        csm = Mac()
        age = ManejadorEventos()
        arr = Arreglos()
        hs = Handshaking()
        mc = Motor_comunicacion()
        mac = Cruam()
        sor = Ordena()
        ejecuciones=0

    """ ----- variables globales ----- """
    canales      = [] #vector que almacena los vectores de información de los radios
    idNet        = [] #arreglo que contiene los identificadores de red
    capacidades  = [] #vector que contiene la capacidad de los canales
    vecinos      = [] #vecinos de un radio CR
    radios       = [] #contiene la cantidad de CR
    canalesBK    = [] #arreglo para los canales de respaldo
    espectro     = [] #vector que contiene los arreglos de canales para cada CR
```



```

matrizTramas=arr.actualizaEstadoMatrizTramas(CRtotales,CW)
m=1

while tiempoS < tiempo_global_simulacion:
    resultado = []

    """ llegada de las terminales primarias en intervalos de tiempo """
    espectro = evn.llegadaPrimarios(tiempoS,espectro)

    eventos_actuales = age.getEvent(tiempoS,agendaCR,sesiones) #regresa los eventos a ejecutarse
    sesiones = eventos_actuales[0] #regresa tuplas: [emisor,receptor]
    agendaCR = eventos_actuales[1] #agenda sin los eventos actuales de ejecucion

    """ Se ejecuta el metodo de conectividad de parametros con la clase conectividad_MAC (main.py) """
    """ regresa matriztramas de forma [0,0,0,idS,idT,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,CW,0,0,0,0,0,0] """
    """ para las tuplas validas que se formaron """

    m=1
    resultado = []
    resultado = csm.parametros_iniciales(matrizTramas,vecinos,capacidades,espectro,sesiones,paquetesTotales)
    matrizTramas = resultado[0]
    espectro = resultado[1]

    """ en este metodo los radios realizan el envio de sus canales para realizar la operacion OR y determinar """
    """ porque canal se van a comunicar, en [11] esta el vector de cada uno de ellos """
    """ regresa el canal de comunicacion de cada tupla valida y los respaldos de cada CR participante """

    matrizTramas = age.establecer_canal_comunicacion(matrizTramas,espectro)
    m=1
    matrizTramas = age.genera_respaldos(espectro,sesiones,matrizTramas,canales_i,cantBK)

    """ Se realiza la ejecucion del protocolo MAC, la bandera de acceso a este metodo corresponde al campo de la """
    """ posicion [13], este debe ser diferente de -1. Este metodo se ejecuta en cada iteracion ejecutando el """
    """ conjunto de pasos definidos en el protocolo, la secuencia de estos pasos se almacena en la posicion de la """
    """ bandera, por lo tanto, una vez concluidos, se coloca el valor de -1 par que los CR no repitan este bloque """

    resultado = mac.cruam(vecinos,espectro,matrizTramas,sesiones,cantBK,ocupados,tamPaq,CW,n)
    matrizTramas = resultado[0]
    ocupados = resultado[1]
    espectro = resultado[2]
    m=1

```

```

""" Para acceder a este metodo, se considera como bandera la posicion [24] de los renglones, de tal forma este """
""" bloque de instrucciones es responsable de ejecutar el proceso del FES solo en aquellas terminales que tengan """
""" un valor distinto de 0 como bandera. Al salir [24]=0 para no volver a entrar """
handshaking = []
handshaking = hs.handshaking(matrizTramas,espectro,sesiones,CW,tiempoS,vecinos)
matrizTramas = handshaking[0]
espectro = handshaking[1]
m=1

"""ahora se ejecuta el motor de comunicacion, procesa aquellas tramas con: TRAMA[19] y [9]=1 """
""" regresa las sesiones MAC y la matriz de tramas con el campo de avance del motor actualizado """
resultado = []
resultado = mc.motor_comunicacion
(matrizTramas,paquetesTotales,sesiones,espectro,cantBK,ocupados,CRlibres,vecinos,CW,tiempoS,n)
""" se recupera la informacion que devuelve la funcion anterior del motor de comunicacion """
matrizTramas = resultado[0]
espectro = resultado[1]
CRlibres = resultado[2]
tiempoS += 1

```

