

# Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa

## División de Ciencias Básicas e Ingeniería

### Control de acceso subyacente para redes inalámbricas cognitivas

Tesis que presenta el  
**Ing. Carlos Salvador Pérez Salgado**

Para obtener el grado de  
**Maestro en Ciencias y Tecnologías de la Información**

Asesores: Dr. Enrique Rodríguez de la Colina  
Dr. Michael Pascoe Chalke

Jurado calificador:  
Presidente: Dr. Víctor Rangel Licea  
Secretario: Dr. Alfonso Prieto Guerrero  
Vocal: Dr. Michael Pascoe Chalke



México, D.F. Enero 2014





Casa abierta al tiempo

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**

---

**Control de acceso subyacente para  
redes inalámbricas cognitivas**

Idónea comunicación de resultados para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

por

Ing. Carlos Salvador Pérez Salgado

Asesores:

Dr. Enrique Rodríguez de la Colina

Dr. Michael Pascoe Chalke

Enero 2014



# Abstract

---

Cognitive radios are devices capable of identifying spectral “holes” left by the transmissions of primary systems and utilize them to send data. Medium access control of cognitive networks represents several challenges because it must ensure that cognitive users avoid or reduce interference to primary users, while transmission rates should be high. Several strategies have been proposed in the literature to achieve an effective control, two well known are those based on distributed coordination, and on control channels.

In this work, two different types of underlay control channels are proposed to coordinate the opportunistic access of cognitive wireless devices operating in ad hoc systems. These channels are capable of operating simultaneously with the primary transmissions without representing a harmful source of interference. One type of channel, the underlay common control channel (UCCC) is utilized to globally coordinate the cognitive network; and the other type of channel consist of a set of underlying local control channels (ULCC), dynamically created to manage cognitive data transmissions over the spectral holes.

Even when the coordination of cognitive networks by means of underlay control channels has been proposed in the literature, similar systems based on two types of simultaneous control channels, capable of relocating, require further analysis and testing.

Therefore, the contribution of this work is to provide an analysis of the viability and efficiency of these channels using simulation. A model to simulate the spectral usage of the primary users was also designed to estimate operation thresholds.



## Resumen

---

Los radios cognitivos son dispositivos capaces de identificar huecos dejados por las transmisiones de los sistemas primarios para efectuar en ellos sus comunicaciones. El control de acceso al medio de las redes cognitivas representa un reto tecnológico que obliga a los usuarios cognitivos a evitar o reducir la interferencia a los primarios y, al mismo tiempo, a mantener altas tasas de transmisión. En la literatura se han propuesto diversas estrategias para efectuar este control, dos de las más importantes son las basadas en la coordinación distribuida, y las que utilizan canales de control.

En este trabajo de investigación se proponen dos tipos de canales de control subyacentes para coordinar el acceso oportunista de dispositivos inalámbricos cognitivos *ad hoc*, estos canales son capaces de operar de forma simultánea con las transmisiones primarias sin representar una fuente severa de interferencia. Uno de éstos, el canal subyacente de control común (UCCC), se encarga de la coordinación global de la red cognitiva, y el otro tipo se integra por un conjunto de canales subyacentes de control local (ULCC), creados de forma dinámica con la finalidad de controlar las transmisiones de datos en los huecos dejados por las transmisiones primarias.

Aun cuando se ha propuesto en la literatura utilizar sistemas de coordinación cognitiva mediante canales subyacentes, no se ha considerado un sistema basado en dos tipos de canales simultáneos capaces de reubicarse ni se ha reportado su eficiencia. Por ende, la contribución de este trabajo es un análisis de la viabilidad y eficiencia de estos canales, obtenida mediante simulaciones; también se diseñó un modelo de simulación de la ocupación espectral primaria para estimar el valor de los umbrales de operación.



## Agradecimientos

---

*Agradezco a mi querida esposa, Claudia Ivonne Martínez Carbajal por sus correcciones, desvelos y continua motivación.*

*Asimismo, agradezco a mis asesores y sinodales por sus comentarios y apoyo durante la investigación y redacción de este documento.*

*También agradezco a todos mis profesores en el posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información por su paciencia y apoyo.*

*Quiero agradecer también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico prestado durante mis estudios de maestría.*

*Por último, y no por eso menos importante, agradezco a mi familia y amigos, quienes de una u otra forma siempre se mostraron dispuestos a ayudarme en lo que les era posible; papá, mamá y Eliza, gracias por la motivación y los consejos.*



# Contenido

---

Lista de figuras.....	i
Lista de cuadros.....	iii
Siglas.....	v
Objetivos.....	vii
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1. Control de acceso al medio en redes cognitivas.....	6
1.1.1. Coordinación distribuida.....	6
1.1.2. Intercambio de mensajes de control.....	7
Capítulo 2 Estado del arte.....	13
2.1. Modificación de CSMA/CA.....	16
2.2. Coordinación distribuida.....	17
2.3. Canales de control.....	17
2.4. Sincronización de la red cognitiva.....	18
2.5. Protocolos adaptables.....	18
2.6. Trabajo relacionado.....	19
Capítulo 3 Propuesta.....	23
3.1. Canal subyacente de control común.....	27
3.1.1. Creación del directorio.....	28
3.1.2. Negociación y establecimiento de los canales locales.....	29
3.1.3. Elección dinámica de la frecuencia de portadora.....	31
3.2. Canales subyacentes de control local.....	31
Capítulo 4 Resultados.....	35
4.1. Capacidad de los canales subyacentes.....	40
4.2. Caracterización de la ocupación espectral primaria.....	43
4.3. Umbrales de operación de los canales subyacentes.....	50
4.3.1. Umbral de protección primaria.....	51
4.3.2. Umbral de conexión secundaria.....	52
4.4. Reubicación dinámica de los canales subyacentes.....	54
Capítulo 5 Conclusiones.....	59
Referencias.....	61



## Lista de figuras

---

Figura 1. Acceso superpuesto y entretreído.....	4
Figura 2. Acceso subyacente.....	5
Figura 3. Canales de control compartidos y dedicados.....	8
Figura 4. Canales de control comunes y múltiples.....	9
Figura 5. Canales de control fijos y móviles.....	10
Figura 6. Canales de control subyacentes.....	11
Figura 7. Topología de la red cognitiva <i>ad hoc</i> estudiada.....	25
Figura 8. Elementos de la relación señal a ruido más interferencia primaria ( $SNIR_{UP}$ ).....	37
Figura 9. $SNIR_{UP}$ en función de la potencia primaria y las fuentes de interferencia.....	38
Figura 10. Elementos de la relación señal a ruido más interferencia secundaria.....	39
Figura 11. Capacidad de los canales de control subyacentes en función de su $SNIR$ .....	40
Figura 12. Capacidad de los canales de control subyacentes en función de su potencia. .	41
Figura 13. Simulación de la percepción espectral (modelo para interiores).....	47
Figura 14. Simulación de la percepción espectral (modelo para exteriores).....	48
Figura 15. Umbral de protección primaria.....	52
Figura 16. Umbral de conexión secundaria.....	54
Figura 17. Criterio para la reubicación de los canales de control.....	55
Figura 18. Detrimento del desempeño de los canales de control si no se reubican.....	56
Figura 19 Tasa de bits erróneos para los canales de control con QPSK.....	58



## Lista de cuadros

---

Cuadro 1. Clasificación de los protocolos CR-MAC consultados en función de sus TRx...	15
Cuadro 2. Características de los CR-MAC <i>ad hoc</i> consultados en la literatura.....	21
Cuadro 3. Características de los canales subyacentes de control propuestos.....	26
Cuadro 4. Propiedades de los sistemas primarios considerados en la simulación.....	46



La lista de siglas se muestra en orden alfabético y remite a los términos en inglés.

<b>Siglas</b>	<b>Significado</b>
ACDSSS	Expansión espectral por secuencia directa con asignación adaptable de portadora
BER	Tasa de bits erróneos
BW	Ancho de banda
CC	Canal de control
CCC	Canal de control común
CCM	Intercambio de mensajes de control en un canal común
CC <sub>UCC</sub>	Capacidad de canal subyacente de control común
CDMA	Acceso múltiple por división de código
CR-CSMA	Acceso múltiple por detección de portadora, cognitivo
CSMA/CA	Acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones
DCM	Intercambio de mensajes de control en canales dedicados
DSA	Acceso dinámico al espectro
DSSS	Expansión espectral por secuencia directa
FBMC-SS	Expansión espectral multiportadora con bancos de filtros
FCM	Intercambio de mensajes de control fijo
FEC	Corrección de errores por adelantado
FHSS	Expansión espectral por saltos de frecuencia
HCM	Intercambio de mensajes de control mediante saltos
ISM	Banda libre, industrial-científica-médica
MCM	Intercambio de mensajes de control en canales múltiples
OCM	Intercambio de mensajes de control en canales superpuestos
OFDM	Multiplexaje por división de frecuencias ortogonales
QoS	Calidad de servicio

<b>Siglas</b>	<b>Significado</b>
QPSK	Codificación por conmutación de fase y cuadratura
CR	Radio cognitivo
CRAHN	Red cognitiva <i>ad hoc</i>
CRN	Red de radios cognitivos
SCM	Intercambio de mensajes de control en canales compartidos
SDR	Radio definido por <i>software</i>
SNIR	Razón señal a ruido más interferencia
SNR	Razón señal a ruido
SS	Espectro expandido
TDMA	Acceso múltiple por división de tiempo
TRx	Transreceptor (radio transmisor-receptor)
UCC	Canal de control subyacente
UCCC	Canal subyacente de control común
UCM	Intercambio de mensajes de control subyacente
ULCC	Canal subyacente de control local
PU	Usuario primario
SU	Usuario secundario
UWB	Banda ultra ancha

# Objetivos

---

Los objetivos de la investigación reportada en este documento son:

- Describir el funcionamiento de los canales subyacentes de control propuestos para coordinar una red *ad hoc* de radios cognitivos, capaces de coexistir con las comunicaciones primarias, y de elegir dinámicamente la frecuencia de su portadora, en función de las condiciones espectrales percibidas por sus nodos
- Determinar, mediante simulaciones, la potencia de los umbrales de operación necesarios para mantener protegidos a los usuarios primarios, y al mismo tiempo asegurar una tasa de transmisión para los canales de control, con la que sea posible coordinar los accesos oportunistas de los usuarios cognitivos a los huecos dejados por las transmisiones primarias
- Proporcionar un modelo de simulación de la ocupación espectral primaria que permita evaluar el desempeño de los canales propuestos

La contribución fundamental de este trabajo es la presentación de un mecanismo de control de acceso al medio para redes cognitivas *ad hoc*, diferente a los reportados en la literatura, el cual utiliza dos tipos de canales de control, basados en una técnica de espectro expandido por secuencia directa con asignación dinámica de portadora. Mediante simulaciones, se analiza su viabilidad y eficiencia, asimismo, se presenta un modelo de la ocupación espectral primaria capaz de estimar la potencia de los umbrales de operación que garantizan la protección de los primarios y una tasa de transmisión mínima para los mensajes de control tal que asegure su utilidad.



---

# Capítulo 1

## Introducción

---

Así como el petróleo, los litorales y la minería, el espectro radioeléctrico es un recurso natural administrado por los gobiernos del mundo. En la mayoría de los países existen instituciones reguladoras que gestionan su uso, por ejemplo, en Estados Unidos de América la Comisión Federal de Comunicaciones y en México Instituto Federal de Telecomunicaciones. Las prácticas más comunes para la administración del espectro radioeléctrico se basan en la subdivisión en bandas –o intervalos de frecuencias– asignadas, según su posición o ancho, a distintas tecnologías o sistemas de comunicaciones [1].

Las bandas del espectro se concesionan, normalmente a particulares, mediante licencias de operación para garantizar su uso exclusivo, sin embargo, también existen bandas de uso libre que no requieren de licencias (un ejemplo son las bandas industriales-científicas-médicas o ISM<sup>1</sup>). En particular, la gratuidad de estas últimas ha permitido el auge de sistemas y tecnologías muy exitosas, tales como las redes inalámbricas Wi-Fi, Bluetooth, y los teléfonos inalámbricos [1]. No obstante, una consecuencia negativa del exitoso desarrollo de estos sistemas es que se origina un problema de congestión que complica la coexistencia entre varios sistemas, al generarse interferencias. Aunado a esto, las técnicas actuales de asignación espectral no evitan la subutilización de las bandas con licencia, debida a la aparición de “huecos” temporales, o espacios vacíos en los canales de comunicaciones durante algunos instantes [1]. Los huecos ocurren cuando los usuarios de alguna banda no realizan una transmisión, y son comunes porque los sistemas de comunicaciones no transmiten constantemente o de forma ininterrumpida.

---

<sup>1</sup> Todas las siglas presentadas en este documento remiten a los términos en inglés.

Como consecuencia, los autores en [2] proponen los radios cognitivos (CR), dispositivos cuyo objetivo es explotar las oportunidades de transmisión –los huecos–, tanto en las bandas libres como en aquellas con licencia. Los CR exploran las condiciones del espectro radioeléctrico y eligen, de manera dinámica, uno o varios canales desocupados para llevar a cabo sus transmisiones, mientras evitan o reducen las interferencias hacia otros sistemas de comunicaciones. Para lograrlo, los CR necesitan reaccionar con celeridad a las condiciones espectrales presentes en su ancho de banda (BW). Normalmente esto se consigue por medio de sistemas inteligentes que les permitan modificar sus parámetros de comunicación, por ejemplo, la potencia de transmisión, la tasa de bits, los diccionarios de códigos, el número y la posición de portadoras, y el esquema de modulación. Asimismo, deben coordinar su acceso a cualquier canal disponible, de tal modo que no sólo eviten interferir las comunicaciones de los usuarios propietarios de dichos canales, sino que además eviten colisiones con otros CR.

En [3], el autor describe el funcionamiento básico de cualquier RC y lo denomina ciclo cognitivo. Éste inicia con la detección de las actividades de los usuarios con licencia, etapa en la que los radios obtienen información del ambiente inalámbrico circundante, la cual les permite elegir de forma dinámica el mejor canal disponible para transmitir. Algunas de las estrategias para la detección de las oportunidades de transmisión son simples pero imprecisas –como la detección de energía–, mientras que otras son más complejas y costosas, normalmente diseñadas para ajustarse a parámetros específicos de algún canal de comunicaciones –por ejemplo, los filtros acoplados–. Asimismo, existen técnicas que, a pesar de ser precisas y no muy complejas, se basan en el conocimiento de las características de los sistemas que operan en los canales explorados –como las detecciones por forma de onda–; sin embargo, la heterogeneidad de una red cognitiva se restringe al depender de la tecnología usada por los usuarios con licencia.

Una vez que se conocen las actividades de los usuarios con licencia, comienza el segundo paso, en el que el CR realiza dos tareas básicas. La primera es la identificación de las características de los canales observados, los cuales pueden marcarse como ocupados o disponibles, en función de algún criterio de decisión específico. La segunda tarea de esta etapa del ciclo consiste en la determinación de la capacidad de los canales que serán utilizados para llevar a cabo las transmisiones.

Finalmente, en el tercer paso del ciclo cognitivo, el transmisor y el receptor mantienen un control constante de la potencia de transmisión y de los accesos dinámicos al espectro (DSA), de tal forma que se evite, o al menos se reduzca, la interferencia de las comunicaciones de los usuarios con licencia. Para establecer una diferencia entre los dispositivos presentes en los canales de comunicaciones, se denomina usuarios primarios (PU) a los usuarios con licencia, y usuarios secundarios (SU) a cada uno de los nodos que integran una red de radios cognitivos (CRN). Además, se asume que los PU no están al tanto de la existencia ni del comportamiento de la CRN, a la que consideran tan sólo un incremento en el ruido del canal.

Por lo que respecta a la forma en la que los CR acceden al medio, en [4] los autores definen tres tipos: acceso superpuesto (*overlay*), acceso entretejido (*interweave*) y acceso subyacente (*underlay*). En el acceso superpuesto, los CR utilizan la mayor cantidad de potencia disponible para realizar sus transmisiones sobre las bandas de los PU, siempre y cuando éstas se encuentren libres, o los SU sean capaces de retransmitir los mensajes de los primarios. Asimismo, la forma en la que se determina la disponibilidad de un canal está basada en el conocimiento de la estructura de los mensajes de los PU por parte de los SU. Así, al ser capaces de comprender los mensajes primarios, los SU evitan las interferencias y coordinan el acceso a las bandas compartidas. Sin embargo, la diversidad de sistemas que operan en las bandas primarias y el posible cambio, sin previo aviso, de

la estructura de sus mensajes obliga la reconfiguración de todos los CR que operan sobre ese canal.

Por su parte, en el acceso entretreído se asume que los CR no cuentan con información de la estructura y contenido de los mensajes de los PU. Esto imposibilita la predicción de sus actividades y obliga a los SU a mantener una observación constante de los canales primarios para determinar las oportunidades de transmisión. Si se considera además, el caso en el que los SU utilizan varios canales primarios de forma simultánea, el tiempo de transmisión se reduce y, por ende, también la interferencia a las transmisiones primarias. Además, el acceso entretreído obliga a los SU a establecer mecanismos para abandonar rápidamente los canales primarios y reanudar las comunicaciones en diferentes canales. Así, la diferencia fundamental entre el acceso entretreído y el superpuesto es el conocimiento que este último requiere de la estructura de los mensajes primarios. La Figura 1 muestra cómo se accede al medio de forma superpuesta y entretreída, se observa que toda la potencia disponible se utiliza para transmitir en los canales de los PU, por esta razón, en algunos casos no se pueden evitar las interferencias a pesar de los mecanismos de contención de la CRN.

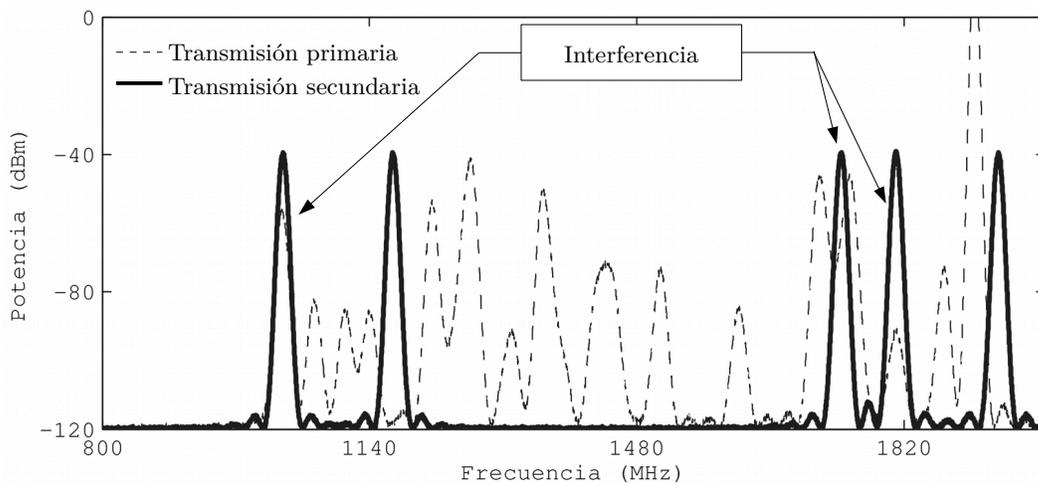


Figura 1. Acceso superpuesto y entretreído. Las líneas punteadas muestran las transmisiones de los usuarios primarios y las sólidas las de los secundarios. Éstos utilizan toda la potencia disponible en los huecos dejados por los PU y en algunos casos las interferencias no pueden evitarse a pesar de los mecanismos de contención empleados por la CRN.

En contraste, en el esquema de acceso subyacente los SU realizan sus transmisiones al mismo tiempo y sobre las mismas bandas de frecuencia en las que se encuentran los PU mediante técnicas de espectro expandido (SS) o de banda ultra ancha (UWB). Estas técnicas permiten la transmisión de señales con potencias muy bajas pero con anchos de banda grandes [5]. Por este motivo, se requiere un control crítico de la potencia de transmisión para mantener reducida la interferencia a los PU. Una práctica común caracterizar los niveles de potencia por medio de umbrales que permitan definir un límite superior para las potencias de transmisión secundarias y las mantengan cercanas a los niveles de ruido en las bandas primarias. En otras palabras, la potencia de las señales de los PU debe ser mucho mayor que la de las transmisiones secundarias, para que la presencia de la CRN sea vista por los PU como un incremento en el ruido de su canal. En la Figura 2 se muestra un ejemplo del acceso subyacente, en ella se observa que los US y los UP utiliza las mismas bandas de frecuencia al mismo tiempo, pero la potencia de las transmisiones primarias es mucho mayor –casi 20 dB– que la empleada por la comunicación secundaria subyacente.

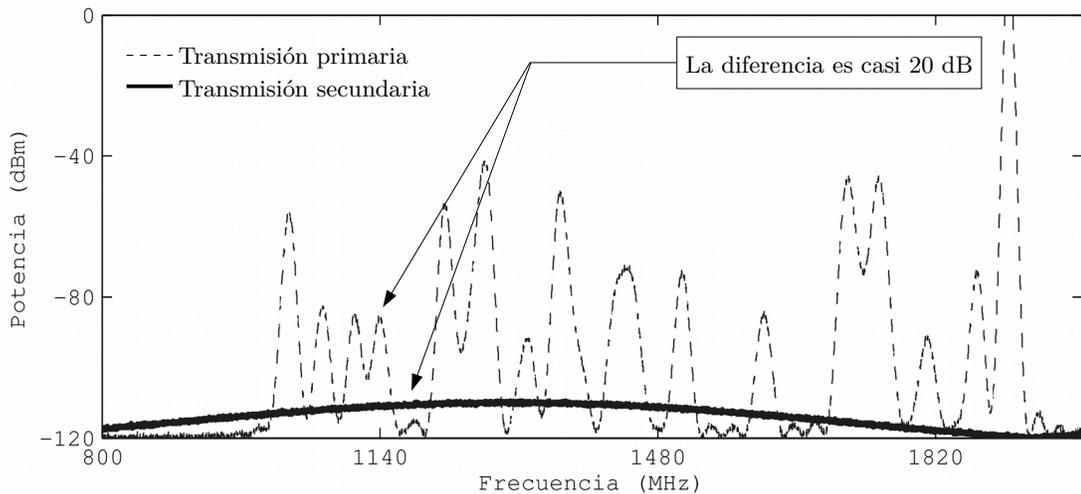


Figura 2. Acceso subyacente. Las líneas punteadas corresponden a las transmisiones primarias y la línea sólida muestra la secundaria. Se observa que los UP y los US utilizan las mismas bandas de frecuencia al mismo tiempo, pero los secundarios transmiten con menor potencia.

## 1.1. Control de acceso al medio en redes cognitivas

El control de acceso al medio en las CRN desempeña un papel muy importante en la mayoría de las funciones de los CR porque debe administrar la movilidad, detección y distribución espectral, así como la asignación de los recursos de *hardware* [1]. La movilidad espectral permite a los SU abandonar un canal cuando se detecta el arribo de algún PU, y acceder en seguida a otro canal que se encuentre disponible para reanudar sus comunicaciones. La detección de canales es la habilidad que tiene un CR de recolectar información de las actividades de los PU y de mantener una representación dinámica del espectro circundante. La asignación de los recursos administra el establecimiento dinámico e inteligente de uno o más canales de comunicación, en función de las necesidades de la CRN. Finalmente, el control de acceso y distribución espectral proporciona un mecanismo de contención interno (entre los nodos de la CRN) y externo (entre PU y SU) que evita o reduce la interferencia nociva entre los sistemas que operan en alguna banda del espectro.

Además, los protocolos de control de acceso al medio para CRN (CR-MAC) utilizan técnicas muy diversas. Éstas van desde plantear escenarios de acceso directo en donde los SU siguen reglas estrictas que dependen de las condiciones en las que se encuentran en cierto momento, hasta la implementación de complejos algoritmos, basados en procesos estocásticos [6,7,8,9] y la teoría de juegos [10]. En particular, dos de las técnicas de control más utilizadas en la literatura se basan en la coordinación distribuida o en el intercambio de mensajes; ambas se explican a continuación.

### 1.1.1. Coordinación distribuida

Los CR-MAC basados en la coordinación distribuida no requieren canales especiales para el intercambio de mensajes de control [11,12,13]. Estos protocolos asignan un mecanismo de decisión a cada nodo de la CRN por medio del cual se accede a algún canal en particular, previamente marcado como disponible, y dependiendo del esquema de acceso utiliza-

do, los nodos evitan o reducen la interferencia causada a los PU y evaden las colisiones con otros SU. En particular, los CR-MAC diseñados a partir del esquema de acceso múltiple por detección de portadoras con evasión de colisiones (CSMA/CA) representan una de las técnicas más utilizadas debido a sus características, las cuales consisten en detectar la presencia de señales en los canales para determinar si es posible iniciar o continuar una comunicación entre los US, en una o varias bandas espectrales.

De hecho, los autores en [14] afirman que los protocolos de coordinación distribuida no dependen del intercambio de mensajes de control para determinar el modo en el que uno o más nodos cognitivos llevarán a cabo sus comunicaciones, su implementación depende de la capacidad de procesamiento de la información adquirida de manera local por cada nodo para lograr una coordinación global de la CRN. Por ende, los nodos de la CRN son complejos, y eventualmente podrían resultar costosos y difíciles de configurar. En otras palabras, aunque la independencia de mensajes de control le proporciona a la CRN la capacidad de operar de forma dinámica, también obliga a cada nodo a contar con la inteligencia necesaria para coordinar el acceso al medio.

### **1.1.2. Intercambio de mensajes de control**

El intercambio de mensajes de control se lleva a cabo a través de uno o más canales, que pueden, o no, estar destinados a ese fin. El objetivo de estos canales es transportar los mensajes que coordinan local o globalmente las RRC, de tal forma que los nodos puedan conocer el estado de sus vecinos y/o de los PU. Los autores de [15] presentan una extensa clasificación de los canales de control. No obstante, se presentan a continuación varias alternativas para el intercambio de mensajes en una CRN.

El *intercambio de mensajes de control en canales dedicados* (DCM) efectúa la transmisión de los mensajes de control en canales separados a los de datos. En contraste, en el *intercambio de mensajes de control en canales compartidos* (SCM) el mismo canal se utiliza para transmitir mensajes de control y de datos. Es posible implementar un SCM

por medio de la subdivisión de un canal en otros más pequeños, otra forma es utilizar divisiones de tiempo en las que los mensajes de datos y de control utilizan todo el ancho de banda del canal, pero no de forma simultánea. La Figura 3 muestra el esquema de funcionamiento del DCM y SCM.

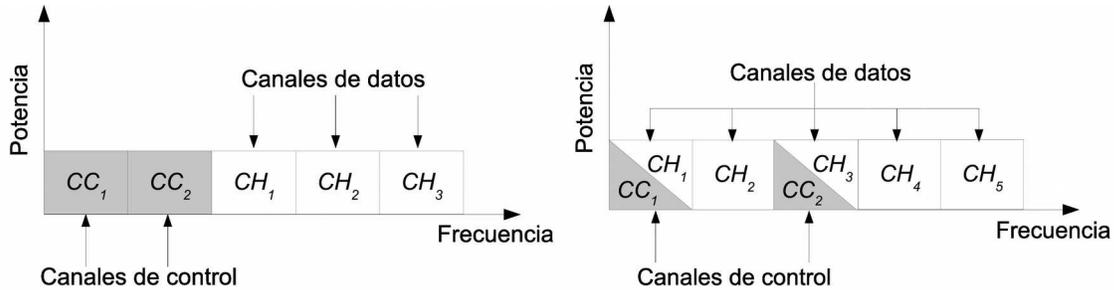


Figura 3. En el DCM (izquierda) los canales de control se usan exclusivamente para el envío de mensajes de control, mientras que en el SCM (derecha) los canales pueden usarse para transmitir mensajes de control o datos.

Asimismo, el *intercambio de mensajes de control en un canal común* (CCM) ocurre cuando todos los nodos participantes en la CRN utilizan el mismo canal para intercambiar sus mensajes de control. Se asume que el canal común se encuentra disponible para toda la red en cualquier momento y que todos los nodos coincidirán siempre en él. Sin embargo, el principal problema de este mecanismo se presenta cuando el canal utilizado se comparte con algún PU, ya que el arribo de éste podría afectar el intercambio de mensajes de control entre los SU y entonces el objetivo de mantener la CRN funcionando en todo momento podría ser muy difícil de conseguir.

Por otro lado, si se considera el caso donde los mensajes de control se transmiten en varios canales, entonces se utiliza el mecanismo de *intercambio de mensajes de control en canales múltiples* (MCM), el cual resulta útil cuando no todos los usuarios perciben las mismas características del espectro, debido a su ubicación espacial. No obstante, este mecanismo presenta un problema cuando un SU identifica un canal disponible y otro lo identifica ocupado al mismo tiempo. Esto hace del MCM un mecanismo complicado de implementar porque todos los SU no sólo deben ser capaces de recibir mensajes de con-

trol en varios canales, sino que además deben identificar canales en común para este fin. Si bien su diseño no es trivial, existe un método denominado aproximación por cúmulos (*clustered approach*), que utiliza un esquema de comunicación cognitivo centralizado. En éste las estaciones base o los nodos maestros de la CRN asignan a cada nodo la lista de canales dedicados al intercambio de mensajes de control durante cierto instante. En la Figura 4 se muestra un ejemplo del CCM y MCM.

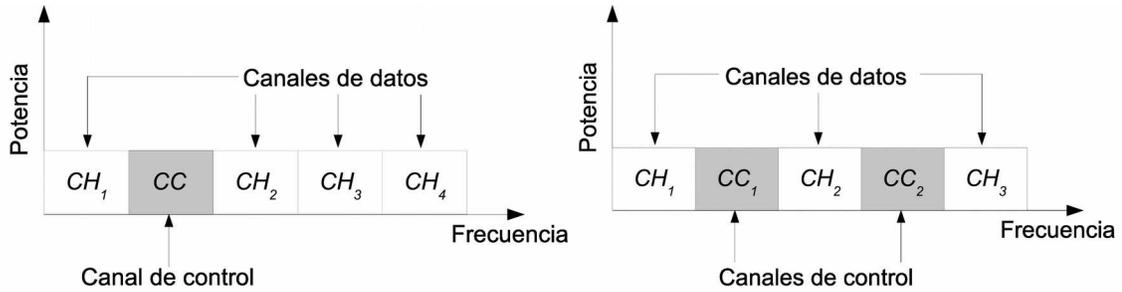


Figura 4. En el CCM (izquierda) sólo hay un canal de control, mientras que en el MCM (derecha) se utilizan varios.

El *intercambio de mensajes de control superpuesto* (OCM) utiliza cualquier canal que se encuentre libre para transmitir sus mensajes de control y presenta dos alternativas. La primera recibe el nombre de *intercambio de mensajes de control fijo* (FCM) y considera que el canal de control es siempre el mismo y está disponible en cualquier momento a todos los nodos de la CRN; su ventaja principal es que todos los SU sintonizan el mismo canal y siempre realizan el intercambio de mensajes de la misma forma. En la literatura se ha propuesto contar, inclusive, con un canal con licencia dedicado a este fin [16], de modo que se asegure la disponibilidad permanente del canal de control para la red cognitiva.

A la segunda alternativa del OCM se le denomina *intercambio de mensajes de control mediante saltos* (HCM) y se basa en el uso dinámico de canales de comunicación para realizar el intercambio de mensajes; la secuencia de saltos entre canales puede estar predefinida o puede elegirse entre el transmisor y el receptor. En este último caso, se ne-

cesita que ambos cuenten con condiciones espectrales similares –la disponibilidad de las mismas bandas al mismo tiempo– para que puedan utilizar los mismos canales a la vez, y la secuencia de los saltos les permita coincidir y evitar a los PU en todo momento. En la Figura 5 se muestran las dos alternativas para los OCM.

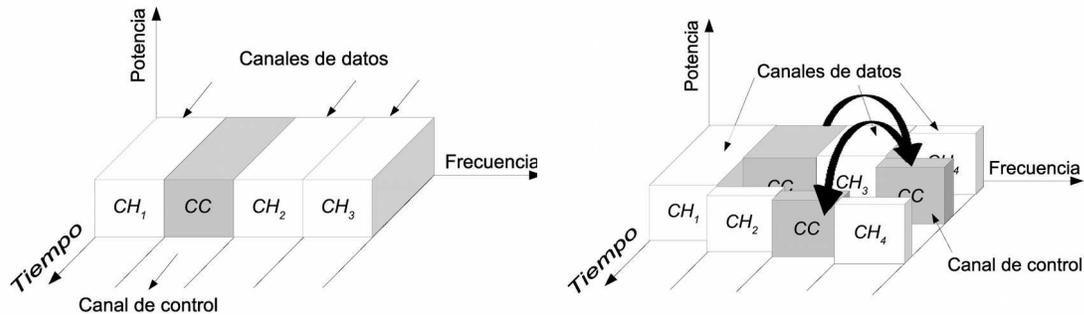


Figura 5. El OCM utiliza toda la potencia posible sobre una banda angosta cuando ésta se encuentra libre de PU. En el FCM (izquierda) el canal de control se mantiene siempre en la misma banda de frecuencias, y en el HCM (derecha) el canal de control “salta” de una banda a otra, en función del tiempo; la secuencia de los saltos puede negociarse entre los SU o estar previamente definida.

Por último, el *intercambio de mensajes de control subyacente* (UCM) se basa en el uso de uno o más canales de banda ancha para enviar y recibir mensajes de control al mismo tiempo que ocurren las transmisiones de los PU; además, la interferencia a éstos se reduce al limitar la potencia máxima permitida a los SU. La principal ventaja del UCM es que proporciona un canal de control siempre disponible a los SU sin la necesidad de contar con un canal superpuesto, compartido o dedicado. No obstante, es de vital importancia elegir cuidadosamente el umbral de potencia y la ubicación de la frecuencia de portadora del UCM, ya que a toda costa deben evitarse o reducirse las interferencias hacia los PU.

En la Figura 6 ilustra como el UCM utiliza las mismas bandas de frecuencia de los canales de datos al mismo tiempo, sin embargo, lo hace con una potencia mucho menor de modo que mediante el control de ésta, la coexistencia entre las transmisiones de datos y control pueda efectuarse sin que ocurran interferencias destructivas.

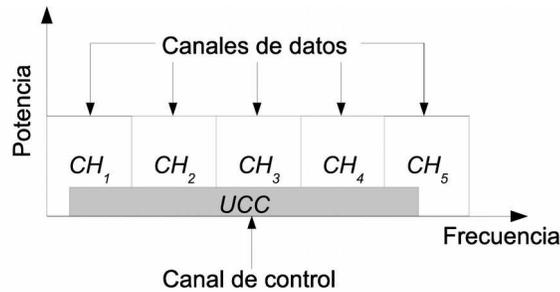


Figura 6. El UCM implementa un canal de control que comparte fracciones o bandas completas con los PU, siempre y cuando su nivel de potencia se mantenga muy por debajo del de las transmisiones de éstos.

En síntesis, el control de acceso al medio en las CRN puede lograrse con técnicas distribuidas, en las que el intercambio de mensajes de control entre los nodos no es necesario o es reducido, ya que cada uno de ellos es capaz de tomar decisiones locales que permiten la coordinación global. Asimismo, las comunicaciones entre los nodos de la CRN también pueden coordinarse mediante el intercambio de mensajes (en uno o más canales de control, estáticos o dinámicos) que permita a los nodos tomar decisiones en conjunto.

El siguiente capítulo presenta un estudio de las alternativas de solución para el acceso al medio en las CRN, en él se clasifican y explican algunas propuestas encontradas en la literatura. En el Capítulo 3 se propone la implementación de dos canales de control subyacentes capaces de elegir de forma dinámica su frecuencia de portadora, con la finalidad de reducir la interferencia a las transmisiones primarias y administrar una red cognitiva de acceso mixto, en la que la transferencia de datos utiliza un acceso al medio entrelazado. Por su parte, el Capítulo 4 muestra los resultados de las simulaciones que permitieron analizar la viabilidad y comportamiento de los canales de control propuestos, los procedimientos utilizados para caracterizar la ocupación espectral de los UP, y la estimación de los umbrales de potencia necesarios para mantener una tasa de transmisión que asegure la utilidad de los mensajes de control y el nivel de protección de las transmisiones primarias. Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones.



---

## Capítulo 2

# Estado del arte

---

En este capítulo se presenta una breve clasificación de los algoritmos consultados en la literatura, así como sus principales tendencias y características. Además, se mencionan algunas propuestas similares a la reportada en este documento, de modo que sea posible presentar parámetros de comparación para validar nuestros resultados.

En la literatura han surgido muchas propuestas para resolver el control de acceso al medio en las redes de radios cognitivos (CRN), algunas plantean la modificación de los protocolos de las redes inalámbricas clásicas [17,14], mientras que otras proponen soluciones innovadoras que van desde el intercambio de mensajes de control mediante la implementación de canales dedicados [16,18], hasta la coordinación distribuida de la CRN por medio de sistemas inteligentes basados en algoritmos complejos, como la inteligencia de enjambres, colonias de insectos y los algoritmos genéticos [1], y los modelos estocásticos; las cadenas parcialmente observables de Markov [6,7,8] y la teoría de juegos [10]. En concreto, la coordinación distribuida se define en [14] como un mecanismo de control que no requiere el intercambio de mensajes, sin embargo, esta definición obedece a la información recolectada de la actividad espectral de los PU, ya que los protocolos basados en el acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones (CSMA/CA), utilizado en las redes inalámbricas IEEE 802.11 –o redes Wi-Fi–, requieren del intercambio de los mensajes de control RTS (*request to send*) y CTS (*clear to send*), los cuales pueden o no, transmitirse en canales dedicados al control o en los mismos canales utilizados para la transmisión de datos.

Un aspecto fundamental de los protocolos de acceso al medio propuestos en la literatura es el número de transmisores-receptores –transreceptores (TRx)– que consideran para su operación. Los RC se basan en la tecnología de radios definidos por *software* (SDR) [2], la cual permite implementar dispositivos de radiocomunicación dinámicos, capaces de ser programados o configurados con relativa facilidad. En suma, mientras menor sea el número de TRx necesarios para administrar de forma eficaz el acceso al medio de los SU, el costo de producción disminuye. Por esta razón, los autores de [19] persiguen la coordinación de una CRN con un sólo TRx y afirman que su protocolo es capaz de efectuar la detección de PU, el intercambio de mensajes de control y la transmisión de datos. Sin embargo, otras propuestas implementan dos TRx independientes, uno para la coordinación de los SU y otro para efectuar las transmisiones de datos, de modo que se reduzca la interferencia a los PU y se incremente el rendimiento de la CRN. De forma semejante, otros protocolos de acceso al medio para redes de radios cognitivos (CR-MAC) utilizan dos TRx para mantener una percepción constante del estado del espectro. Incluso, algunos autores [9,20] proponen el uso de tantos TRx como canales se tenga en la CRN. Conviene mencionar en este punto que algunas propuestas, además de emplear canales de control y de datos, también recurren a canales dedicados para emitir “tonos ocupados”, cuya función es avisar a los otros miembros de la CRN que mantienen un enlace de comunicaciones con algún SU de la misma CRN. De este modo evitan el problema de la terminal oculta multicanal<sup>2</sup>. Otro caso se presenta en [21], donde los autores proponen el uso de tres TRx, uno para el control, otro para el tono ocupado y el último para la transmisión de datos. El Cuadro 1 presenta una lista de los protocolos revisados en la literatura y los clasifica de acuerdo con el número de TRx que utilizan. Todos los CR-MAC estudiados asumen que sus TRx pueden tan sólo transmitir o recibir datos o

---

<sup>2</sup> Ocorre cuando un nodo ocupado en una transmisión no recibe un mensaje que le indique que un canal se reserva para la comunicación de otros nodos. Así, el nodo considera disponible un canal que realmente se encuentra ocupado y al utilizarlo genera una colisión [1].

mensajes de control durante ciertos instantes, pero no hacer ambas cosas a la vez, esto es, los consideran dispositivos *half-duplex*.

Cuadro 1. Clasificación de los CR-MAC revisados de acuerdo con su número de transreceptores

Número de TRx	CR-MAC
1	CR-ALOHA y CR-CSMA [11], CRUAM-MAC [12], M-np-CSMA [14], Q-p-CSMA [17], DC-MAC [6], Cog-MAC [7], Cooper-MAC [22], C-MAC [23], DCC-MAC [24], HD-MAC [13], HC-MAC [25], DSA-CRMAC [26], OS-MAC [16], SRAC [19], VCCC-MCMAC [27].
2	AMAC [28], MCCRAN-MAC [18], CLO-MAC [8], CogMAC-e [29], SYN-MAC [30], MMAC-CR [30], AACC-UWB [31], OSA-UWB [32], DOSS [21].
3	DOSS [21].
$N$	COMAC [9], CREAM-MAC [20].
No especificado	GTDSA-MAC [10], CogMesh [33].

En el estudio de los CR-MAC destaca, también, el análisis de la topología de la CRN. Los autores de [11] y [34] consideran redes secundarias con infraestructura (en las que existen estaciones base secundarias), en contraste, la mayoría de los protocolos consultados estudian el acceso al medio de redes cognitivas *ad hoc* (CRAHN). En [15] se presenta un comparación entre las redes *ad hoc* clásicas y las cognitivas, los autores afirman que las CRAHN, además de realizar la funciones de una red *ad hoc* clásica, deben: 1) elegir uno o varios canales de forma dinámica para efectuar sus enlaces de comunicación; 2) mantener el control de la topología de la red, lo cual en las redes clásicas se resuelve fácilmente mediante señales de baliza (*beacon*, en inglés), pero en el ambiente cognitivo su implementación resulta más complicada o ineficiente; 3) efectuar transmisiones multicanal y multisaltos considerando la disponibilidad de los canales, en función de la actividad de los PU además de la carga debida a las transmisiones secundarias, y finalmente, 4) distinguir la movilidad de los SU de las interrupciones provocadas por el arribo de PU,

lo que obliga a la CRAHN a implementar mecanismos de reconexión que permitan una recuperación rápida de los enlaces, de modo que sea posible garantizar cierta calidad de servicio (QoS) a los usuarios.

Por estas razones, la detección de la actividad primaria es fundamental para mejorar la explotación de las oportunidades de transmisión y para reducir las colisiones (entre SU) y las interferencias (a los PU). Para ilustrar esto, en [6] se afirma que una percepción de todo el espectro visible por los SU es ineficiente debido al alto consumo de energía y las necesidades de *hardware*; además, las características de tráfico de la CRN, especialmente las aplicaciones que transmiten por ráfagas, definen las necesidades reales de detección de oportunidades. En otras palabras, no se necesita conocer el estado instantáneo de los canales primarios a menos que se tengan mensajes que transmitir. Asimismo, en [18] se sugiere contar con dos mecanismos de detección, uno oportunista cuando no se tienen datos en espera de transmisión, de modo que se identifiquen canales con mayor probabilidad de oportunidades, y otro urgente cuando se desea transmitir, acotado a los canales previamente seleccionados.

## **2.1. Modificación de CSMA/CA**

Una de las líneas de investigación que se identifica en la literatura consiste en la modificación del protocolo CSMA/CA para efectuar la administración de redes cognitivas. Por ejemplo, en [11] se plantea la implementación de un protocolo cognitivo de acceso múltiple por detección de portadora (CR-CSMA) para planificar los paquetes de los SU. CR-CSMA primero percibe la actividad espectral asociada a los PU, hasta que encuentra un canal desocupado; en seguida, inicia la detección de portadoras secundarias para gestionar su acceso (asimismo, los autores también consideran una modificación del protocolo ALOHA, al que denominan CR-ALOHA, para efectuar las transferencias de datos en la CRN). De forma similar, en [12], los autores utilizan canales de respaldo que les permiten

---

continuar las transmisiones secundarias sin la necesidad de volver a negociar un canal disponible. Otro caso semejante se plantea en [17,14], donde se modifica CSMA/CA para introducir un modelo de recompensas que reduce las colisiones con los PU y los SU.

## 2.2. Coordinación distribuida

Además de la modificación de CSMA/CA, otras propuestas consideran la coordinación distribuida de la CRN para evitar canales de control en los que se efectúe el intercambio de mensajes que gestionen el acceso de los SU a los canales de los PU. Como ya se mencionó en párrafos anteriores, los autores de [14] afirman que los sistemas de comunicaciones distribuidos no requieren intercambio de información entre los usuarios porque cada nodo contiene por los canales según sus propias políticas de acceso, las que a su vez dependen exclusivamente de la información espectral recolectada de forma local.

Asimismo, en [6] no se asume que cada SU conoce de forma global la disponibilidad de los canales, sino que cada nodo de la CRN puede percibir la actividad de los PU en un conjunto de canales locales, y elegir un subconjunto de éstos que le permita decidir si se puede efectuar una transmisión, basando obviamente su juicio en los resultados de la exploración espectral realizada. Otra alternativa que evita los canales de control se presenta en [12], donde los autores incluyen información de control a las tramas de datos para permitir a los SU coordinarse y elegir los canales de respaldo.

## 2.3. Canales de control

No obstante, la necesidad de un canal de control es un tema ampliamente abordado en la literatura y presenta varias alternativas, entre las que se encuentran un canal de control común (CCC) disponible a todos los nodos de la CRN, uno o varios canales de control (CC) locales, fijos o móviles, que sólo pueden utilizar algunos nodos en ciertos instantes, y los canales de encuentro [23,35] –o *rendezvous channels* como se les denomina en inglés–, en los que convergen varios usuarios secundarios (US) para intercambiar mensa-

jes de control y/o información sobre la actividad de los usuarios primarios (PU). La implementación de un CCC introduce varios retos, entre los que destacan la necesidad de ubicarlo en una banda de frecuencias fija, visible a todos los SU, y libre de actividades de PU, considerando incluso una banda con licencia dedicada a este fin o la utilización de las bandas libres industriales-científicas-médicas (ISM) [8,9,29], además, el CCC requiere, en algunos casos, la implementación de otro algoritmo que coordine el acceso de los SU a éste; por ejemplo, los autores de [8,9,13,24] utilizan CSMA/CA en sus respectivos CCC.

Para lidiar con el problema de congestión se ha valorado la utilización de más de un CC al subdividir la CRN en grupos o cúmulos que administren de modo local el intercambio de mensajes de control [10,33].

## **2.4. Sincronización de la red cognitiva**

Otro aspecto importante de los CR-MAC es la sincronía de los nodos secundarios. Por ejemplo, los autores de SYN-MAC [30] evitan el uso de un CCC dedicado y el problema de la terminal oculta multicanal por medio de la división del tiempo de sus tramas en tantos intervalos como canales se tenga, de modo que cada una trama corresponda a un canal. Otro enfoque similar ocurre en GTDSA-MAC [10], donde la sincronía es indispensable para coordinar el juego que todos los nodos de la CRN efectúan para la gestión de su acceso al medio. De forma semejante, DCC-MAC [24], HD-MAC [13], DSA-CRMAC [26] y OS-MAC [16] dependen de la sincronía de sus nodos para su funcionamiento adecuado.

## **2.5. Protocolos adaptables**

Por último, se destacan también las propuestas que esbozan la gestión de las CRN mediante protocolos adaptables que reaccionan a las condiciones espectrales. Uno de éstos es AMAC [28], el cual consiste en tres fases: 1) la selección inicial (arbitraria o preestablecida) de un protocolo MAC; 2) la adaptación de la capa física para compensar los efectos de los canales, y 3) la adaptación del protocolo MAC cuando los ajustes de la capa

---

física no son suficientes. La elección del nuevo protocolo se realiza mediante la votación de los nodos de la CRN en el canal de control. Por ejemplo, AMAC puede establecer inicialmente CSMA/CA para coordinar una red en la que existen muchas oportunidades para transmitir, no obstante, si el aumento de la actividad primaria restringe las ventanas de transmisión a intervalos cortos pero periódicos, entonces los nodos eligen un esquema de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) como alternativa para mantener los enlaces de comunicación.

## 2.6. Trabajo relacionado

En la literatura también se ha planteado el uso de canales de control subyacentes (UCC), con técnicas de espectro expandido (SS) o banda ultra ancha (UWB) para proporcionar un canal “siempre disponible” que no dependa de la presencia de PU. No obstante, la incorporación de un UCC implica el diseño de una CRN capaz de acceder al medio de forma mixta, es decir, el protocolo debe considerar el control de los mensajes de control de forma subyacente y la transmisión de datos de forma superpuesta o entretejida. Por ejemplo, a diferencia de [12], donde se considera la transferencia subyacente de datos en ciertos instantes, los autores en [31,32] manifiestan que el uso de un UCC con UWB tiende a maximizar la eficiencia espectral de las redes cognitivas al mantener un CC siempre disponible a todos los nodos, capaz de coexistir con las redes primarias, mientras las transmisiones de datos ocurren de forma superpuesta (asumen que la red primaria es GSM). Un enfoque similar se adopta en [36], donde los autores proponen el intercambio de la información correspondiente a la actividad de los PU a través de un UCC con UWB, mientras los datos se modulan con *wavelets* de portadoras coseno alzado, de modo que su utilización espectral se ajuste a los huecos dejados por las transmisiones primarias.

En contraste, en [37] los autores deciden recurrir a técnicas de SS para implementar un UCC; específicamente, afirman que la técnica de expansión espectral multiportado-

ra con bancos de filtros (FBMC-SS) discrimina de forma natural las bandas primarias. Sin embargo, en la investigación aquí reportada se prefiere una técnica de expansión espectral menos compleja, la secuencia directa (DSSS), que simplifica el *hardware* de los radios cognitivos (CR) y disminuye su costo, idea similar a la presentada en [38]. De hecho, se plantean reubicaciones inteligentes de la portadora del DSSS para reducir la interferencia generada a los PU cuando el nivel de interferencia supera el umbral de tolerancia. Dado que este tema constituye parte fundamental de la investigación, su funcionamiento se explica con mayor detalle en el Capítulo 3, y los resultados de su análisis, obtenidos mediante simulaciones, en el Capítulo 4.

\* \* \*

En resumen, en la literatura se presentan múltiples alternativas para la solución de los problemas de CR-MAC, las cuales van desde la implementación de algoritmos de coordinación distribuida hasta la administración de la red cognitiva mediante el intercambio de mensajes en canales de control. En particular estos últimos son un tema ampliamente discutido y, entre ellos, uno que ofrece interesantes áreas de oportunidad es el control subyacente. El Cuadro 2 concentra los CR-MAC consultados en la literatura para las redes cognitivas *ad hoc*, indica si se basan en CSMA/CA, cómo coordinan su acceso al medio y el tipo de canales de control que utilizan.

El siguiente capítulo presenta la explicación de los canales de control subyacentes propuestos en este documento para coordinar el acceso al medio de una CRAHN, basados en técnicas de espectro expandido, capaces de simplificar el esquema propuesto en [37], y establecer un mecanismo fiable para los nodos secundarios que priorice la protección de los PU al minimizar las interferencias, y al mismo tiempo proporcione un medio fiable, mediante el cual, puedan intercambiar mensajes que controlen el acceso oportunista a las bandas primarias.

Cuadro 2. Características de los CR-MAC *ad hoc* consultados en la literatura

<b>CR-MAC</b>	<b>CSMA/CA</b>	<b>Coordinación</b>	<b>Tipo de CC</b>
CR-CSMA [11]	Sí	Distribuida	-
CR-ALOHA [11]	No, ALOHA	Distribuida	-
CRUAM-MAC [12]	Sí	Mensajes de control	Control en las tramas de datos
DC-MAC [6]	Sí	Distribuida	-
Cog-MAC [7]	Sí	Distribuida	-
GTDSA-MAC [10]	No	Mensajes de control	CCC
MCCRAN-MAC [18]	No	Mensajes de control	CCC dedicado
CLO-MAC [8]	No	Mensajes de control	CCC ranurado
DOSS [21]	No	Mensajes de control	CCC móvil
Cooper-MAC [22]	No	Mensajes de control	CCC
Cog-Mesh [33]	No	Mensajes de control	CC virtual, múltiple, no hay CCC
HD-MAC [13]	Sí	Mensajes de control	Varios CC móviles, no hay CCC
HC-MAC [25]	No	Mensajes de control	CCC con CSMA/CA
DSA-CRMAC [26]	No	Mensajes de control	CCC ranurado
SRAC [19]	Sí	Distribuida	-



---

## Capítulo 3

# Propuesta

---

En este documento se propone y estudia la utilización de dos tipos de canales de control subyacentes simultáneos, el canal subyacente de control común (UCCC), disponible a todos los nodos de la red cognitiva *ad hoc* (CRAHN) y responsable de la coordinación global de la red; el otro tipo de canal de control se encarga de la administración de las transmisiones de cada pareja de nodos, y consiste en la creación dinámica y temporal de canales subyacentes de control local (ULCC), similares a los propuestos en [38]. Para ello, se utiliza un esquema de acceso múltiple por división de código (CDMA) que habilite el acceso simultáneo de varios usuarios secundarios (SU) sobre las bandas de los usuarios primarios (PU), basado en una técnica de expansión espectral híbrida, constituida por la combinación de secuencia directa (DSSS) y saltos de frecuencias, (FHSS).

Cuando se combinan dos o más técnicas de espectro expandido (SS) con el objetivo de explotar sus características individuales se dice que ésta es híbrida. Por ejemplo, si se utiliza una combinación de DSSS y FHSS, la posición de las portadoras del espectro expandido por la secuencia directa cambia de acuerdo con la secuencia de saltos, lo cual proporciona un esquema de acceso al medio dinámico y subyacente a las comunicaciones primarias.

Por esta razón, se propone un esquema de expansión espectral por secuencia directa con asignación adaptable de portadora (*Adaptive Carrier Direct Sequence Spread Spectrum*, o simplemente, ACDSSS), basado en la combinación de DSSS y FHSS, aunque este último utiliza una secuencia de saltos no predefinida que se ajusta a las condiciones espectrales primarias, percibidas por los SU.

Mediante este esquema se asignan diferentes frecuencias de portadora ( $f_c$ ) a los canales de control subyacentes, de modo que perturben lo menos posible las comunicaciones primarias, al reducir la interferencia generada; y mantengan una tasa de bits erróneos (BER) lo suficientemente baja para asegurar la utilidad y fiabilidad de la información de control de la red secundaria.

El análisis aquí presentado se restringe al enlace local de dos o más SU, no obstante, el caso en el que una pareja de nodos requiere encaminamientos para enviar y recibir datos está fuera del alcance de esta investigación; no obstante, podría tratarse como un problema de capa superior –la de red–, tal como se define en el modelo OSI [39]. En concreto, nuestro escenario considera una CRAHN de un solo salto, formada por  $N$  SU equipados con dos TRx *half-duplex* capaces de percibir las actividades espectrales mediante detecciones de energía. Por un lado, el TRx de datos es apto para realizar detecciones de alta resolución en una o más bandas de frecuencia de ancho arbitrario (fijo o variable), así como de transmitir y recibir señales de banda angosta (con modulaciones OFDM [25,20], por *wavelets* [36], o simplemente QPSK), las cuales utilizan de forma oportuna los huecos dejados por las comunicaciones de los UP. Por otro lado, el TRx de control efectúa detecciones de baja resolución sobre bandas anchas y es capaz de transmitir señales de CDMA con portadoras definidas de forma dinámica. En otras palabras, los SU comparten las bandas de los PU de dos formas, una simultánea en la que transmiten mensajes de control subyacentes a las comunicaciones primarias (a través del UCCC o los ULCC); y otra oportunista en la que utilizan uno o más canales libres de PU para transmitir sus tramas de datos.

La topología de la red asume la presencia de  $M$  redes primarias heterogéneas e independientes, *ad hoc* o con infraestructura. Los PU transmiten únicamente en sus respectivos canales, con licencia o libres. La red secundaria se ubica dentro de la zona de cobertura de una o más redes primarias y es capaz de detectar la energía de los PU en

cada uno de sus canales, pero no de comprender sus mensajes. Asimismo, mantiene una zona de cobertura local en la que todos los SU perciben el UCCC. Esta detección depende del nivel de potencia máximo permitido para transmitir, y de la atenuación provocada por las pérdidas por trayectoria. Para definir el área de cobertura se asume que la propagación de las señales inalámbricas de la CRAHN obedece al modelo de pérdidas por trayectoria simplificado [40], explicado más adelante en el Capítulo 4. La Figura 7 ilustra la topología descrita, en la que se observan tres redes primarias, dos con infraestructura (redes 2 y 3), y una *ad hoc* (red 3).

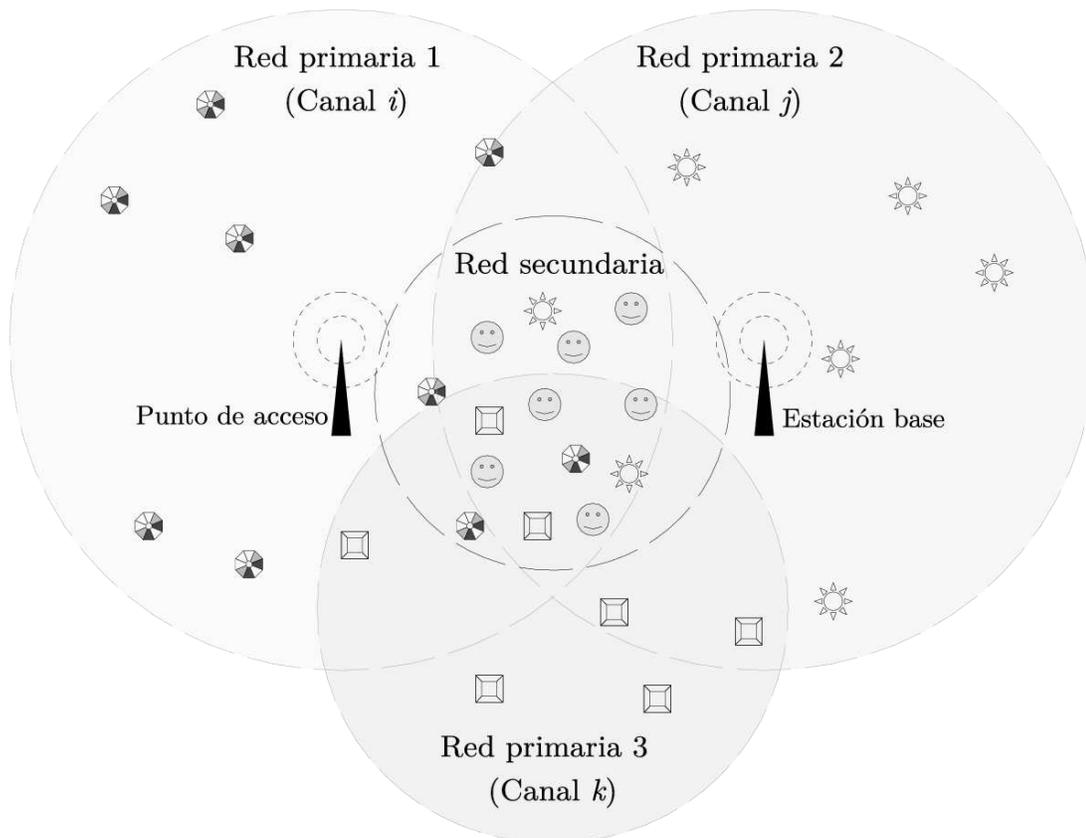


Figura 7. Topología de la CRAHN estudiada. Los nodos de las redes 1, 2 y 3 se representan con los símbolos ,  y , respectivamente. Los US (😊) están dentro de la zona de cobertura de las tres redes primarias.

En la topología ilustrada se asume que cada red opera en su propio canal, el cual puede contar con licencia o ubicarse en una banda libre. La red secundaria se sitúa den-

tro de la zona de cobertura de todas las redes primarias y debe utilizar, de forma oportunista, los huecos dejados por los PU en sus canales para efectuar sus transmisiones de datos. Además, mantiene al menos dos canales de control subyacentes, cuya potencia y ancho de banda se ajustan para mantener una BER y un nivel de interferencia bajos.

En el Cuadro 3 se presentan las características de la propuesta, de acuerdo con el número de TRx, tipo de coordinación y canales de control, cobertura, número de saltos y otras características.

Cuadro 3. Características de la propuesta de control de acceso al medio para CRAHN.

<b>Canales de control</b>	<p>Dos canales subyacentes:</p> <p>UCCC. Común a todos los nodos, permite el intercambio de mensajes que gestionan la creación y mantenimiento de una red <i>ad hoc</i>, así como la generación de canales de control locales.</p> <p>ULCC. Sólo es visible por los nodos que establecen un enlace de comunicaciones, puede ser punto a punto, o punto a multipunto; permite la transferencia de mensajes que coordinan las transmisiones entretrejidas de datos.</p>
<b>Cobertura</b>	Definida por la zona en la que todos los nodos secundarios pueden escuchar el UCCC.
<b>Número de saltos</b>	Uno (se asume que el ambiente multisalto puede controlarse con protocolos de capa superior)
<b>Número de TRx</b>	Dos, uno para la transferencia de mensajes de control subyacentes, y otro para la transmisión entretrejida de datos.
<b>Tipo de coordinación</b>	Mediante el intercambio de mensajes de control en dos canales subyacentes.

En seguida se explican las características de los canales de control propuestos para la coordinación del acceso al medio mixto (subyacente-entretrejido) de una CRAHN.

### 3.1. Canal subyacente de control común

El UCCC permite la coordinación global de la red de radios cognitivos y se asume que está siempre disponible a todos los nodos que forman un conjunto local. En este canal se efectúan tres tareas básicas, la primera es el intercambio de mensajes responsables de generar y mantener un registro de los nodos de la CRAHN; la segunda tarea coordina la creación dinámica de los ULCC, usados para gestionar, punto a punto o punto a multipunto, las transmisiones oportunistas de datos de los SU; y finalmente, la tercera tarea consiste en la decisión, convenida entre los nodos de la red, de modificar la  $f_C$  del UCCC.

Se considera que todos los nodos de CRAHN son capaces de identificar uno o varios UCCC sin importar la  $f_C$  que utilice, debido a que los códigos utilizados por los canales comunes son conocidos, esto es, previamente designados; y elegidos en función de su disponibilidad. Cabe mencionar que siempre hay un sólo UCCC asociado a cada red. Por ejemplo, si se tiene un par de redes,  $CRAHN_A$  y  $CRAHN_B$ , cada una de ellas cuenta con su canal de control común, en este caso,  $UCCC_A$  y  $UCCC_B$ , respectivamente; además, los  $n$  nodos de  $CRAHN_A$  pertenecen a ella si, y sólo si, son capaces de escuchar y transmitir en  $UCCC_A$ , no obstante, un nodo puede pertenecer a varias redes, por ejemplo  $CRAHN_A$  y  $CRAHN_B$ , siempre y cuando escuche los mensajes de ambos canales ( $UCCC_A$  y  $UCCC_B$ ) y renueve su suscripción en ellos. Sin embargo, aunque se menciona esta posibilidad, la pertenencia a más de una CRAHN está fuera del alcance de este documento y, por ende, no será abordada.

Con la finalidad de explicar el funcionamiento del UCCC, considérese un  $SU_i$  que no pertenece a ninguna red. Cuando el  $SU_i$  enciende, inicia la detección de redes cognitivas, probando cada uno de los códigos de red predefinidos, lo cual genera tres posibilidades: en la primera,  $SU_i$  es capaz de identificar  $CRAHN_A$  y  $CRAHN_B$ , en seguida solicita al usuario que elija a cuál debe adherirse, una vez elegida la red deseada, sea por ejemplo  $CRAHN_A$ ,  $SU_i$  contiente por el  $UCCC_A$ , cuando accede a él, difunde un mensaje de presen-

tación que incluye su identificador (nombre del nodo), su dirección física y su llave para generar los códigos de CDMA para los canales locales; la segunda posibilidad asume que el nodo  $SU_i$  identifica a  $CRAHN_A$  y  $CRAHN_B$ , pero el usuario desea iniciar una red diferente, por lo tanto  $SU_i$  elige, de forma aleatoria entre una lista de códigos de CDMA, uno distinto al de  $CRAHN_A$  y  $CRAHN_B$ , y genera  $CRAHN_C$ ; finalmente, la tercera posibilidad considera que  $SU_i$  no pudo identificar ninguna red disponible, esto se le comunica al usuario, quien decide entre tres opciones: intentar nuevamente la detección; cancelar la búsqueda y que el radio pase a una etapa de ahorro de energía; o bien, iniciar una nueva  $CRAHN$ . Además, es posible que las  $CRAHN$  cuenten con un mecanismo de cifrado para que una contraseña permita la adhesión de nuevos miembros.

La contención de este canal se basa en el CSMA/CA, pero se sustituye la detección de portadora por la identificación de las transmisiones subyacentes cuyo código de acceso múltiple corresponda al utilizado por el UCCC, en otras palabras, los SU sintonizan su TRx de control al código de CDMA del UCCC; una vez sintonizados, cuando el SU identifica el código considera que el canal subyacente está ocupado y cuando no percibe una transmisión con dicho código, asume que el está libre y entonces envía sus mensajes para reservarlo. Así, cuando el nodo obtiene acceso exclusivo al canal común efectúa la transmisión de sus mensajes de control.

La trama de control común permite la difusión, la comunicación punto a multipunto, y punto a punto, todas basadas en las direcciones físicas asignadas de forma única a cada SU; la carga de la trama consiste en la información necesaria para efectuar las tareas mencionadas al inicio de esta sección, las cuales serán detalladas en seguida.

### **3.1.1. Creación del directorio**

El directorio contiene información de cada uno los vecinos de un SU, e incluye sus nombres o identificadores, sus direcciones físicas, y las llaves que permiten seleccionar los códigos ortogonales o secuencias pseudoaleatorias necesarias para establecer un ULCC.

---

Cada registro del directorio expira después de cierto tiempo para evitar su crecimiento desmedido y el almacenamiento de información irrelevante. Por lo tanto, se requiere que cada nodo difunda mensajes en el UCCC de forma periódica y, de esta manera, renueve su permanencia en el directorio de sus vecinos. El algoritmo para la creación del directorio se describe a continuación.

1. Un  $SU_i$  identifica la presencia del UCCC y ajusta sus parámetros de comunicaciones a éste.
2.  $SU_i$  escucha el canal subyacente hasta que se encuentre desocupado –no se identifique actividad en él–, cuando esto ocurre difunde una trama con sus datos.
3. En seguida,  $SU_i$  espera la confirmación de sus vecinos, la cual contiene a su vez la información necesaria para generar su propio directorio. Si no se recibe respuesta de ningún vecino,  $SU_i$  realiza una retirada exponencial similar a la implementada en el CSMA/CA e intenta de nuevo hasta agotar un contador de intentos; si esto ocurre, se notifica al usuario que no se pudo establecer un enlace con otros nodos, dejando en sus manos la decisión de reintentar o cancelar la búsqueda.
4. Una vez que  $SU_i$  recibe los mensajes de confirmación de sus vecinos, ha integrado su directorio;  $SU_i$  permanecerá escuchando el UCCC y transmitirá de forma periódica sus mensajes de renovación, a menos que establezca un canal local o abandone la red. La frecuencia con la que se envía cada mensaje de renovación es baja para ahorrar energía, pero no excede el tiempo necesario para que su registro expire en el directorio de sus vecinos.

### **3.1.2. Negociación y establecimiento de los canales locales**

Cuando dos o más nodos de la CRAHN tienen datos para transmitir utilizan el UCCC para coordinar la creación de un ULCC que les permita gestionar el acceso oportunista a las bandas de los PU para efectuar la transmisión de sus datos. Con la finalidad de explicar

el algoritmo para la negociación y establecimiento de un ULCC se consideran dos casos: el primero consiste en un enlace punto a punto que asume la presencia de  $SU_i$  como transmisor y de  $SU_j$  como receptor; el segundo caso es un enlace punto a multipunto y considera también a  $SU_i$  como transmisor, pero a  $SU_j$  y  $SU_k$  como receptores.

Para establecer el enlace punto a punto,  $SU_i$  envía un mensaje dirigido a  $SU_j$  a través del UCCC, en el que le solicita establecer un canal local a ambos, denominado  $ULCC_{i,j}$ .  $SU_i$  propone una  $f_C$  basada en una percepción espectral de banda ancha y de baja resolución, y establece el código de CDMA que se usará para generar el canal local. Es importante mencionar que si  $SU_j$  está ocupado en otra transmisión o abandona la red, no es capaz de responder, en cuyo caso,  $SU_i$  intentaría establecer un enlace nuevamente, hasta que agote un número de intentos permitidos. No obstante, si  $SU_j$  recibe la solicitud de  $SU_i$ , envía una respuesta en la que confirma la  $f_C$ , o propone otra. Además, se asume que la capa física efectúa los ajustes a la potencia de transmisión necesarios para mantener una comunicación exitosa, además de agregar la redundancia necesaria para reducir el número de retransmisiones. Cuando  $SU_i$  recibe la confirmación de  $SU_j$  ajusta su TRx de control a la  $f_C$  negociada y envía tramas en  $ULCC_{i,j}$  hasta recibir la respuesta de  $SU_j$ , lo cual implica que el canal local se ha establecido. Si  $SU_j$  no contesta después de un número finito de intentos,  $SU_i$  regresa al UCCC e intenta establecer un nuevo canal local.

En un enlace punto a multipunto el procedimiento es semejante, no obstante, no se requiere que ambos ( $SU_j$  y  $SU_k$ ) confirmen el establecimiento del canal local en la  $f_C$  propuesta por  $SU_i$ , ya que un canal local punto a punto será establecido si al menos uno de ellos responde, ya sea  $ULCC_j$  o  $ULCC_k$ . Si embargo, si se asume que ambos confirman, entonces el canal que se establece es punto a multipunto,  $ULCC_{i,jk}$ , y permite la coordinación de las transmisiones de  $SU_i$  a  $SU_j$  y  $SU_k$ . La implementación de los ULCC punto a multipunto es necesaria porque aun cuando el UCCC involucra a todos los nodos de la

CRAHN, en este último no se permite la coordinación de las transmisiones de datos. La contención del ULCC será explicada más adelante.

Por último, cuando las transmisiones locales terminan, los nodos participantes regresan al UCCC, renuevan su suscripción y se mantienen disponibles para establecer otro enlace local.

### 3.1.3. Elección dinámica de la frecuencia de portadora

Si las condiciones espectrales en las que opera el UCCC cambian hasta el punto en el que la BER deteriora la eficiencia de las transmisiones de control, o el nivel de potencia de los PU es tan bajo que la interferencia del UCCC supera el umbral permitido, los nodos efectúan de forma independiente una percepción espectral de banda ancha y baja resolución, y en seguida proponen una nueva  $f_c$ . Posteriormente cada uno analiza las  $f_c$  propuestas por sus vecinos, y entre todos eligen la que presente las mejores condiciones espectrales.

Una vez que la nueva  $f_c$  se establece, el UCCC reanuda su funcionamiento habitual, en el que cada nodo transmite sus mensajes de renovación del directorio y se encuentra a la espera de establecer canales locales para el control de las transmisiones de datos entre dos o más SU.

## 3.2. Canales subyacentes de control local

Como ya se mencionó, existen varios ULCC de forma simultánea, uno por cada enlace entre los nodos de la CRAHN. Estos canales se establecen mediante el intercambio de mensajes en el UCCC y su función es coordinar el acceso entretelado a los canales primarios, de modo que éstos se utilicen de forma oportunista. La naturaleza de las portadoras (OFDM, *wavelets* o QPSK) utilizadas en los huecos están fuera del alcance de esta investigación, por lo que simplemente se les denomina accesos oportunistas.

Los nodos secundarios inactivos –sin datos para transmitir– no realizan detecciones espectrales hasta que se les solicita por medio del ULCC, para ahorrar energía. Se

asume que el TRx de datos es capaz de percibir con alta resolución las oportunidades de transmisión en bandas angostas, así como de enviar y recibir tramas en una o más bandas de ancho arbitrario (fijo o variable), las cuales por simplicidad integran un conjunto, no necesariamente adyacente, de canales de ancho predefinido.

Como se emplea detección de energía, los nodos no pueden discriminar entre PU y SU, sin embargo, determinan la potencia de sus portadoras y establecen una tolerancia para sus fluctuaciones, de modo que le permita identificar una colisión. Si ésta ocurriera, los nodos abandonan el canal y utilizan otro que se encuentre disponible. Dado que las comunicaciones de datos y control son simultáneas, es posible reaccionar más rápidamente a una colisión y elegir otro canal. Además, se pueden utilizar canales de respaldo que permitan reanudar la transmisión de datos, semejantes a los propuestos en [12].

Mientras las transmisiones de datos ocurren, los TRx de control conmutan entre dos fases, la detección de baja resolución y el intercambio de mensajes en el ULCC. La primera permite identificar zonas con baja presencia de primarios, de modo que las detecciones de alta resolución, efectuadas por los TRx de datos entre cada transmisión, tomen menos tiempo. Durante la segunda fase, los SU deciden sobre el ULCC los canales que se utilizan para enviar y recibir sus mensajes de datos, mediante el intercambio de la lista de disponibilidad, la cual contiene información sobre los canales que pueden utilizarse para transmitir. Si éstos son contiguos, se agrupan para utilizar un ancho de banda mayor, con el objetivo de disminuir el tiempo de utilización de los canales primarios. Por esta razón, resulta también de suma importancia minimizar el número de retransmisiones y favorecer la transmisión de ráfagas de datos que utilicen el menor tiempo posible los huecos disponibles.

Además de coordinar la transmisión de datos, los ULCC permiten su propia reubicación sobre otras bandas primarias, con la finalidad de reducir la interferencia a los PU y/o de mejorar su BER, lo cual implica contar con mejores tasas de transmisión, y por

ende, un intercambio de mensajes de control que aproveche mejor las oportunidades de transmisión de los datos. La negociación se realiza, únicamente, entre los nodos participantes en cada ULCC, y se basa en sus respectivas percepciones espectrales.

Con respecto a la contención de los ULCC, su funcionamiento también es semejante al CSMA/CA, aunque es mucho más simple cuando sólo participa un reducido número de nodos; no obstante, el peor caso ocurre cuando un nodo difunde datos en la CRAHN, porque el transmisor debe coordinarse con todos los nodos destino, de modo que se utilicen los huecos primarios comunes a todos. Estos enlaces no consideran retransmisiones automáticas, en su lugar se asume que la recuperación de paquetes no corresponde al algoritmo de acceso al medio, sino que es tarea de la capa de transporte. Aunque esto podría ser ineficiente en una red de un sólo salto, se asume que en la capa física se utilizan códigos de corrección de errores por adelantado (FEC), capaces de mejorar la BER de los datos.

Por último, es de suma importancia que los mensajes de control en los ULCC sean rápidos y fiables. Por este motivo, se utilizan mensajes cortos cuya carga se restringe a la lista de los canales disponibles; las solicitudes de reubicación del canal local; las interrupciones de transmisión, que implican mudar la transmisión a canales de respaldo, y por último, los acuses de las transmisiones exitosas.

En el siguiente capítulo se presenta el modelo de simulación utilizado para caracterizar la ocupación espectral primaria, de modo que se determinen los umbrales para las transmisiones subyacentes, asimismo se presentan los resultados sobre los estudios de la viabilidad de los canales de control, mediante el análisis de su capacidad de canal y BER.



---

## Capítulo 4

# Resultados

---

Con la finalidad de analizar la viabilidad y el desempeño de los canales de control propuestos en el capítulo anterior, en éste se presenta un análisis del balance entre la tasa de transmisión y la interferencia provocada a las transmisiones primarias. Asimismo, se estudian los factores que permiten la determinación de su ancho de banda (BW) y frecuencia de portadora ( $f_c$ ), en función de las características de los sistemas primarios. Por último, se determinan los umbrales de potencia bajo los que se consideró la presencia de la red cognitiva *ad hoc* (CRAHN) inocua para las transmisiones primarias.

Cabe mencionar que aun cuando la operación de un canal subyacente de control para las redes secundarias puede disminuir la relación señal a ruido (SNR) de los usuarios primarios (PU), su impacto no es severo porque sólo una fracción del espectro de la señal secundaria de banda ancha invade el canal primario de banda angosta, y lo hace con una potencia mucho menor [5]. No obstante, es indispensable contar con una forma de relacionar la potencia de los PU y la fracción del espectro de los canales subyacentes, de modo que sea posible cuantificar las interferencias desde la perspectiva de los PU, y de esta manera diseñar mecanismos que le proporcionen protección. Además, se necesita que las comunicaciones en los canales de control subyacentes mantengan una tasa de transferencia que les permita intercambiar mensajes lo más rápido posible y con el menor número de retransmisiones, para que la información de control encargada de la gestión de las transmisiones de datos sea reciente y, por ende, útil.

Por consiguiente, a continuación se establecen dos relaciones señal a ruido más interferencia (SNIR) similares a las presentadas en [38]; una primaria, capaz de medir la

interferencia de los canales subyacentes (UCC), y una secundaria, cuyo objetivo es determinar la potencia máxima que asegure una tasa de transferencia lo suficientemente alta de los mensajes de control.

La expresión matemática de la SNIR desde la perspectiva de los PU ( $\text{SNIR}_{\text{PU}}$ ) se muestra en (1), donde  $P_{\text{PU}}$  es la potencia media de los PU, percibida por el TRx de control de un SU sobre el BW de detección;  $N$  es la potencia de ruido (ruido térmico en un caso ideal, aunque puede ser cualquier otra fuente de ruido identificada durante la detección);  $\Delta P_{\text{UCCC}}$  es la potencia de la fracción del espectro del canal subyacente de control común (UCCC) ubicada en la banda del PU; y por último,  $\Delta P^k_{\text{ULCC}}$  corresponde a la potencia de la fracción del espectro de cada uno de los canales subyacentes de control local (ULCC) también presentes en la banda primaria.

$$\text{SNIR}_{\text{PU}} = \frac{P_{\text{PU}}}{N + \Delta P_{\text{UCCC}} + \sum_{k=1}^n \Delta P^k_{\text{ULCC}}} \quad (1)$$

La Figura 8 muestra varias transmisiones primarias, y tres canales de control secundarios, se observa que sobre el ancho de banda de un PU está presente una fracción de uno de los canales subyacentes. Así, la  $\text{SNIR}_{\text{PU}}$  es un parámetro que permite medir la viabilidad de una comunicación subyacente, al definir el nivel máximo de la potencia del UCCC, la superposición de las fracciones de los ULCC, y el ruido. Durante esta investigación se asume que una  $\text{SNIR}_{\text{PU}}$  superior a 20 dB es suficiente para asegurar la protección de las comunicaciones primarias.

A partir de una modificación a la fórmula de Shannon-Hartley para la capacidad de canal [41], en la que se sustituyó la SNR por la  $\text{SNIR}_{\text{PU}}$ , se establece la expresión matemática de la estimación de la capacidad del canal primario, a la cual se le denomina simplemente  $\text{CC}_{\text{PU}}$ , y se muestra en (2).

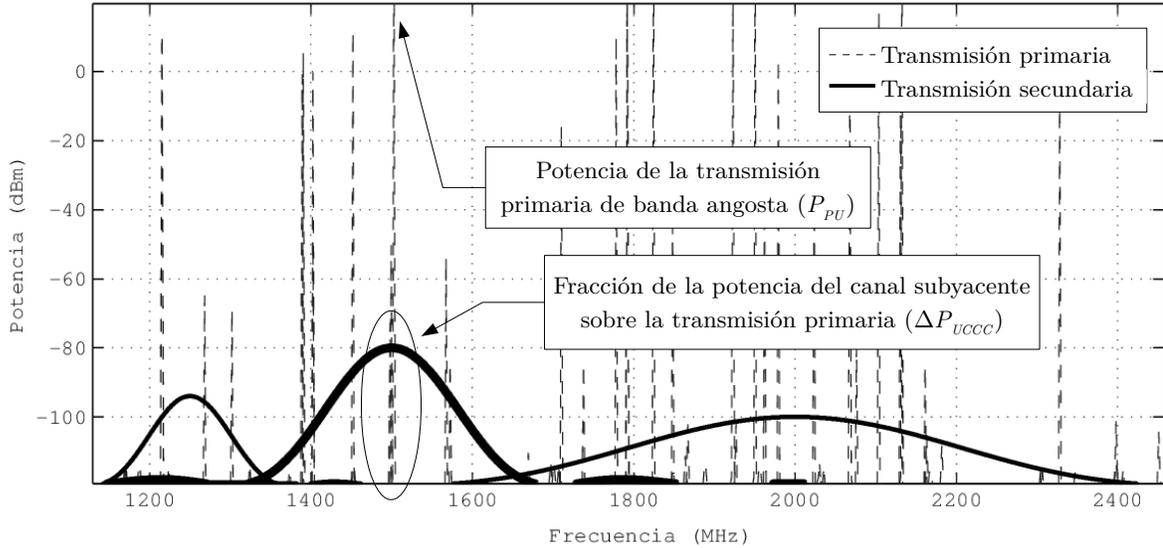


Figura 8. Representación gráfica de los términos que integran la  $SNIR_{PU}$ . Las líneas sólidas representan los canales de control subyacentes, y las líneas punteadas representan las transmisiones primarias.

Para ejemplificar esta idea, considérense un PU con tecnología Wi-Fi que opera con un ancho de banda de 20 MHz, y que la relación entre su potencia y las fuentes de interferencia y ruido, debidas a la presencia de uno o más canales secundarios, o sea su  $SNIR_{PU}$ , tiene una magnitud de 20 dB; según (2), la  $CC_{PU}$  sería ligeramente mayor que 133 Mb/s, valor que supera la máxima tasa de transferencia considerada para ese sistema (54 Mb/s). Asimismo, un PU GSM con un ancho de banda de 200 kHz y una  $SNIR_{PU}$  de 20 dB produciría una  $CC_{PU}$  de 1.33 Mb/s, la cual supera también la tasa de transmisión típica para un sistema GSM (aproximadamente 270 kb/s [42]).

$$CC_{PU} = BW_{PU} \log_2(1 + SNIR_{PU}) \quad (2)$$

En la Figura 9 se muestra la  $SNIR_{PU}$  como función de  $P_{PU}$  y la combinación del ruido y las transmisiones subyacentes, es decir, el denominador de (1) expresado simplemente como  $P_{SU}$ ; además se establece que la  $SNIR_{PU}$  es buena cuando su valor es mayor a 20 dB, mala cuando está entre 0 y 20 dB, y nula cuando es menor que 20 dB.

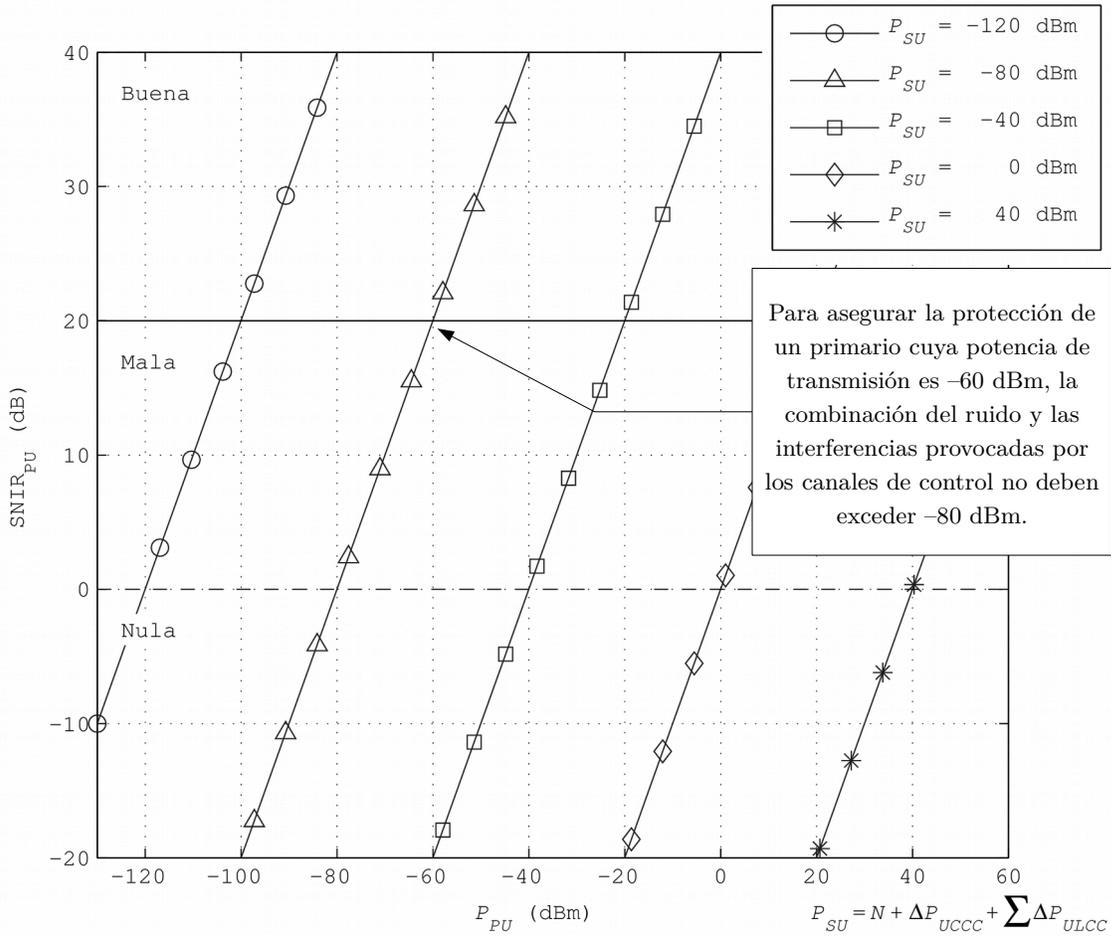


Figura 9. Determinación de la  $SNIR_{PU}$  en función de la potencia media de un PU ( $P_{PU}$ ) y la combinación del ruido y las interferencias provocadas por la potencia de los canales subyacentes en su ancho de banda ( $P_{SU}$ ). La  $SNIR_{PU}$  se define nula, mala o buena, de acuerdo con su nivel de protección al primario. Se asume que si su valor excede 20 dB proporciona buena protección.

En contraste, la  $SNIR$  medida desde la perspectiva de los SU mide la calidad de las transmisiones secundarias y considera las transmisiones primarias y cualquier otro canal subyacente sobre su BW una fuente de interferencia. Todos los SU en la red cognitiva *ad hoc* (CRAHN) deben calcular, al menos, dos  $SNIR$ ; una para su UCCC ( $SNIR_{UCCC}$ ) y otra para los ULCC que generan cada vez que controlan una transmisión de datos ( $SNIR_{ULCC}$ ).

La expresión matemática de la  $SNIR_{UCCC}$  se muestra en (3), donde  $P_{UCCC}$  corresponde a la potencia media del UCCC,  $P_{PU}^m$  es el valor medio de la potencia primaria percibida en el BW del canal de control;  $\Delta P_{UCCC}^j$  es la suma de las fracciones de los espectros

de todos los UCCC asociados a otras  $n$  CRAHN que se ubican en su BW;  $N$  es la potencia del ruido, y por último,  $\Delta P^k_{ULCC}$  corresponde a la suma de las fracciones de los espectros, pero de los  $m$  ULCC que se encuentren activos en el BW del UCCC. De forma semejante, la expresión matemática de la  $SNIR_{ULCC}$  se muestra en (4), donde  $P_{ULCC}$  representa la potencia media del ULCC.

$$SNIR_{UCCC} = \frac{P_{UCCC}}{N + P_{PU}^m + \sum_{j=1}^n \Delta P^j_{UCCC} + \sum_{k=1}^m \Delta P^k_{ULCC}} \quad (3)$$

$$SNIR_{ULCC} = \frac{P_{ULCC}}{N + P_{PU}^m + \sum_{j=1}^n \Delta P^j_{UCCC} + \sum_{k=1 \neq i}^m \Delta P^k_{ULCC}} \quad (4)$$

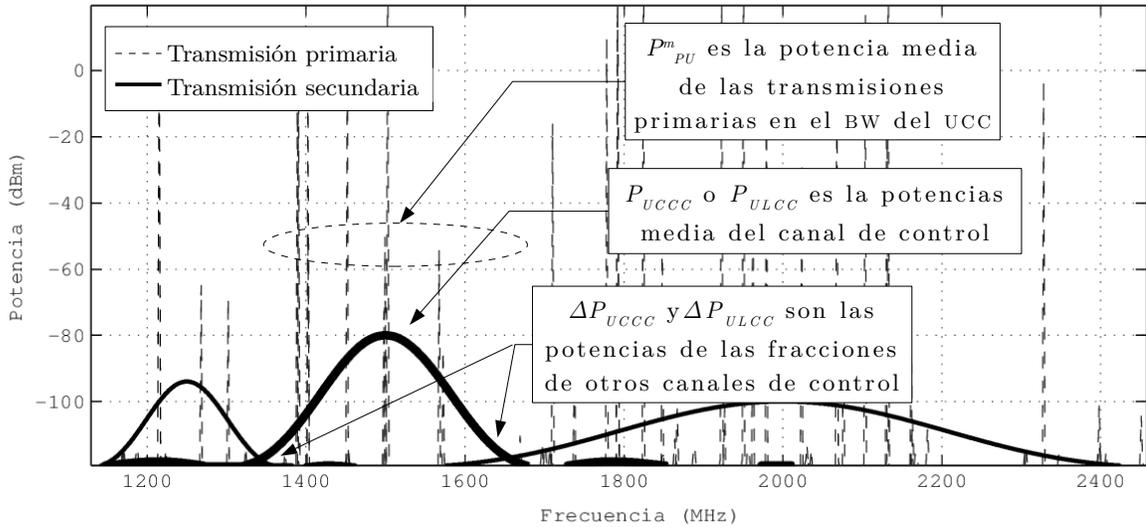


Figura 10. Representación gráfica de los términos que integran las  $SNIR_{UCCC}$  y  $SNIR_{ULCC}$ . La línea sólida representa los canales de control y las líneas punteadas representan las potencias primarias.

Con base en estas definiciones de la SNIR, la siguiente sección presenta un análisis de la capacidad de los canales de control subyacentes propuestos.

## 4.1. Capacidad de los canales subyacentes

Para el cálculo de la capacidad del UCCC se utilizó  $SNIR_{UCCC}$  en lugar de  $SNIR_{PU}$  en (2) (para los ULCC se usa  $SNIR_{ULCC}$ ) y se emplearon diferentes valores del ancho de banda. En la Figura 11 se muestra la capacidad de un UCCC (aunque los resultados obtenidos pueden aplicarse indistintamente a un ULCC), se consideró que la capacidad del canal subyacente de control común ( $CC_{UCCC}$ ) debía ser, al menos, 100 kb/s para asegurar que la información de los mensajes de control es útil para los nodos de la CRAHN.

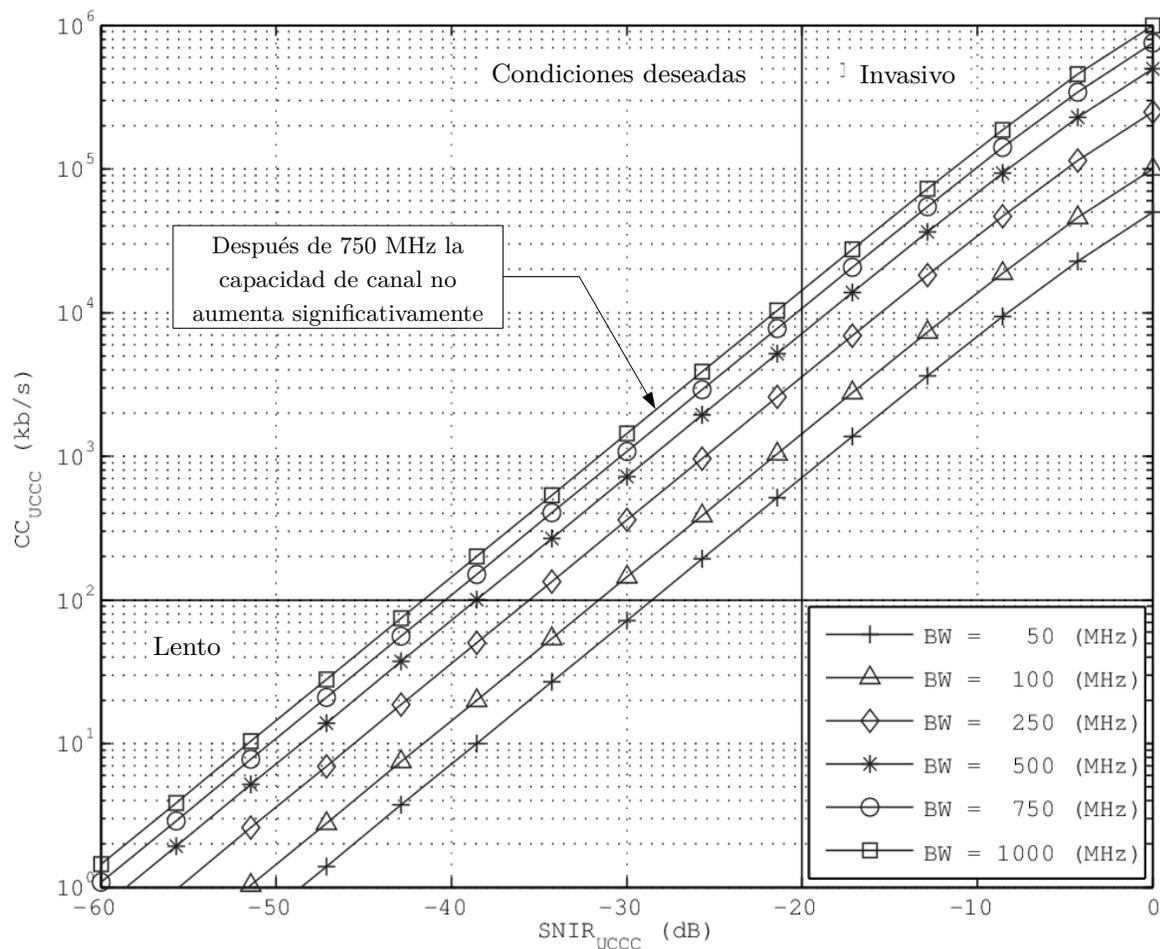


Figura 11. Capacidad de un UCCC en función de su SNIR y BW. Se muestra además la región en la que la tasa de transmisión se considera lenta (por debajo de 100 kb/s), y en la que la SNIR es demasiado alta (arriba de -20 dB), y por ende, invasiva para las comunicaciones primarias.

La Figura 12 también muestra la  $CC_{UCC}$ , pero como una función de la  $P_{PU}^m$ , el BW del UCC y la  $P_{UCC}$ . Se observa que mientras menor es la  $P_{PU}^m$ , la  $P_{UCC}$  debe disminuirse de modo que se mantenga 20 dB por debajo, y su interferencia a las transmisiones primarias sea aceptable.

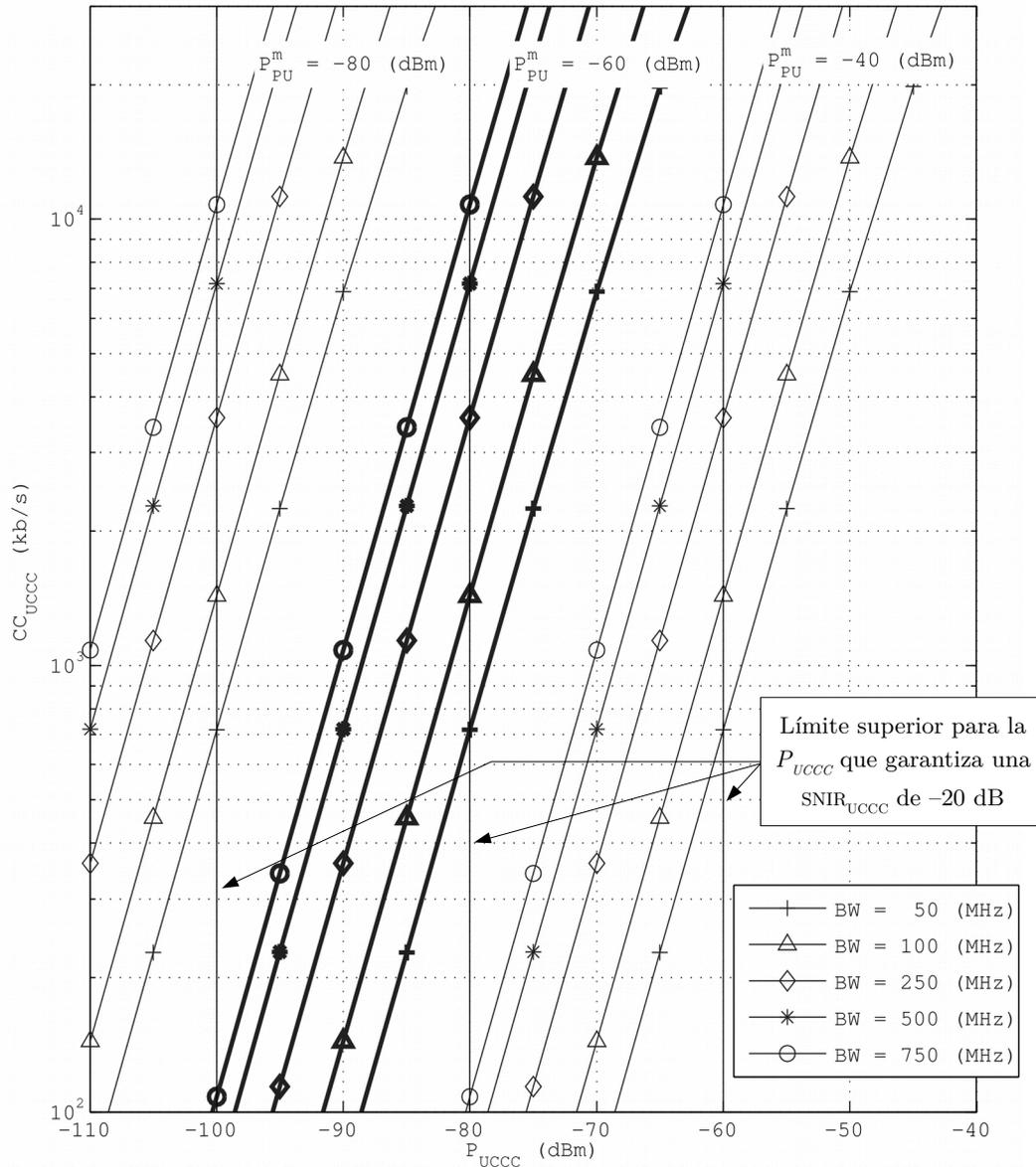


Figura 12. Capacidad del canal de control subyacente (por arriba de 100 kb/s) expresada en función de la  $P_{UCC}$ , el BW y la  $P_{PU}^m$ . Por simplicidad, esta última ya incluye los efectos del ruido y la combinación de las interferencias provocadas por otros canales subyacentes. Las líneas verticales marcan el límite de  $P_{UCC}$  en función de  $P_{PU}^m$  para mantener la  $\text{SNIR}_{UCC}$  por debajo de  $-20$   $\text{dB}$ .

Además del cálculo de la SNIR, se necesita determinar el límite inferior de la  $P_{PU}^m$  que considera desocupados a un conjunto de canales primarios. Por esta razón, debe asumirse que un conjunto de bandas primarias están desocupadas o su carga es mínima durante cierto instante, cuando la  $P_{PU}^m$  es más cercana a la magnitud de la potencia mínima con la que los primarios operan en su bandas o bien a la máxima sensibilidad de los US. Por ejemplo, si la banda utiliza tecnología Wi-Fi y su  $P_{PU}^m$  es  $-80$  dBm, entonces puede considerarse que todos y cada uno de los PU presentes están en la zona crítica de recepción de mensajes, o bien que la mayoría de las percepciones corresponden a canales vacíos, lo cual implica que es seguro utilizar una  $P_{UCCC}$  mayor.

Sin embargo, se asume que los SU no pueden diferenciar, durante las percepciones espectrales, el origen de sus mediciones, a excepción de la potencia del UCCC o el ULCC que se establezca; es decir, al momento de efectuar las detecciones espectrales los SU no son capaces de identificar si las potencias percibidas en las bandas primarias pertenecen a éstos, o bien, corresponden a otros SU. Por esta razón, la única estrategia viable para la estimación de la SNIR consiste en considerar tan sólo dos variables: como denominador la potencia percibida en las bandas primarias, como numerador el conocimiento que se tiene de la potencia del UCCC o de los ULCC utilizados.

Para ejemplificar esta idea considérese que un SU percibe en promedio  $-80$  dBm sobre el BW de su canal de control, la CRAHN utiliza un UCCC de  $-100$  dBm, y el SU que efectúa la percepción espectral no controla en ese momento ninguna transmisión de datos y, por ende, no mantiene activo ningún ULCC; la  $SNIR_{UCCC}$  calculada es entonces de  $-20$  dB, porque la potencia promedio percibida de  $-80$  dBm representa el denominador de (3) al no poder diferenciar entre PU y otros SU.

En síntesis, cada SU utiliza la información obtenida del medio inalámbrico para estimar el valor de la SNIR y, basado en él, decidir la eventual reubicación de sus canales subyacentes en otras bandas. La sección 4.4 describe los criterios empleados para deter-

minar cómo y cuándo modificar la frecuencia de de la portadora ( $f_c$ ) de los canales de control. Por su parte, la siguiente sección presenta el modelo de la caracterización de las actividades primarias, obtenido por medio de simulaciones y utilizado como una herramienta para la estimación de los umbrales de operación para los canales subyacentes, y sus eventuales reubicaciones.

## 4.2. Caracterización de la ocupación espectral primaria

Con la finalidad de proporcionar un escenario de simulación semejante a la realidad, se diseñó un modelo de caracterización de la ocupación espectral de los PU con MATLAB<sup>®</sup>. El escenario de simulación acotó el BW de los SU entre 800 y 2500 MHz, intervalo que cubre varios sistemas inalámbricos con licencia y libres, como las redes de telefonía celular, Wi-Fi, Bluetooth, la navegación aeronáutica y muchos más. Con la finalidad de presentar condiciones cercanas a la realidad se consultó [43] para definir los sistemas operantes en dichas bandas; asimismo, las características de dichos sistemas se obtuvieron de [44,45,46]. Se asumió la sensibilidad de los TRx de control en  $-120$  dBm, por lo que cualquier señal por debajo de este nivel se trató como el ruido de piso del dispositivo.

Dado que la simulación emula la potencia percibida por un solo SU durante su etapa de detección espectral de banda ancha y baja resolución, se asumió que su TRx de control tomaba una muestra cada 5 ms, y se definió la ventana de muestreo de la detección espectral primaria con una duración de medio segundo. Razón por la que se generaron 500 muestras mediante el modelo simplificado de pérdidas por trayectoria [40] mostrado en (5).

$$P_{R_x} \text{ dBm} = P_{T_x} \text{ dBm} + K \text{ dB} - 10 \gamma \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - \psi \text{ dB} \quad (5)$$

Donde,  $P_{Rx}$  es la potencia percibida en el TRx de control,  $P_{Tx}$  es la potencia transmitida por cada PU en su banda,  $K$  es una constante que representa las características de las antenas y la atenuación promedio del canal inalámbrico,  $r$  es la distancia entre el SU y la fuente primaria,  $r_0$  es la distancia de referencia para el campo lejano de la antena según el escenario de simulación utilizado, y  $\gamma$  es el coeficiente de pérdidas por trayectoria; asimismo,  $\psi$  es una variable aleatoria log-normal con media 0 dB y 3 dB que representa los efectos del ensombrecimiento y otros efectos de los canales inalámbricos.

Además, para todos los casos, el valor de  $K$  se asumió la ganancia en el espacio libre para antenas isotrópicas [40], la cual depende de la  $f_c$  de cada señal primaria. La expresión de  $K$  se muestra en (6),  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \times 10^8$  m/s).

$$K \text{ dB} = 20 \log \left( \frac{c}{4\pi f_c r_0} \right) \quad (6)$$

La simulación cubrió dos casos con la finalidad de considerar que los SU son móviles, uno en exteriores y otro en interiores. Para el ambiente exterior, la distancia entre los SU y las fuentes primarias se definió como una variable aleatoria uniformemente distribuida (v.a.u.)  $r \in [10, 300]$ m; la distancia de referencia  $r_0$  fue 10 m y, por último, el coeficiente de pérdidas por trayectoria se definió como una v.a.u.  $\gamma \in [2.7, 3.5]$  [40]. Por su parte, la simulación de la operación en interiores consideró condiciones particulares en función de algunas bandas de frecuencias, por ejemplo, para los sistemas de telefonía celular se asumió que la distancia a la estación base estaba entre 40 y 60 m, pero un teléfono podía ubicarse entre 1 y 20 m del receptor secundario, lo cual obligó un ajuste que compensara estas condiciones. Asimismo, se disminuyó la cantidad e intensidad de las transmisiones de los sistemas de radionavegación y radioastronomía, y se dio mayor importancia a las redes Wi-Fi y Bluetooth. La distancia entre el SU y las fuentes primarias se definió como una v.a.u.  $r \in [1, 20]$ m; la distancia de referencia  $r_0$  fue 1 m, y para el

coeficiente de pérdidas por trayectoria se utilizó una v.a.u.  $\gamma \in [1.6, 3.5]$  [40]. Asimismo, para establecer la frecuencia de las portadoras en cada banda primaria se dividió su BW en canales y se utilizó el valor de su potencia media de transmisión, según su tecnología [44,45,46]; la actividad de los PU en cada canal se modeló como un evento aleatorio encendido-apagado controlado según la intensidad de carga asignada a la red primaria, la cual se determinó de forma manual, desde 10 a 100%, para medir distintos escenarios.

El Cuadro 4 muestra las bandas de frecuencia de los sistemas considerados, así como los valores típicos para el ancho de banda de sus canales, su potencia de transmisión, y la sensibilidad de sus receptores. En particular, este último parámetro se consideró de suma importancia porque permitió determinar las bandas en las que la presencia de los canales de control subyacentes podría afectar con mayor severidad las transmisiones primarias. A su vez, la Figura 13 presenta el resultado de la simulación después de 500 muestras en el ambiente de interiores, el cual, como ya se mencionó, asume una mayor actividad en las bandas de telefonía celular y de redes Wi-Fi. La combinación de los resultados permite definir los niveles mínimos de la potencia percibida en cada una de las bandas primarias y, por ende, proporciona información útil para el establecimiento de los umbrales bajo los cuales las comunicaciones de control subyacentes pueden ocurrir sin representar fuentes de interferencia severas a las redes primarias.

Por ejemplo, en la figura se observa que la tendencia de los sistemas en la banda comprendida entre 1.67 y 2.4 GHz es operar entre  $-60$  y  $-120$  dBm, por esta razón, su uso debe evitarse, y elegir una  $f_c$  que ubique los canales de control en otras bandas. En contraste, entre 1.3 y 1.6 GHz la simulación arroja resultados cuya interpretación indica que el SU no percibió transmisiones primarias menores a  $-80$  dBm, lo cual permite operar con mayor seguridad, ya que para mantener la  $P_{UCC}$  20 dB por debajo de la  $P_{PU}^m$  se necesitaría tan sólo que su valor se limitara a  $-100$  dBm, el cual se considera fácilmente asequible por los TRx de control.

Cuadro 4. BW, sensibilidad de los receptores, y potencias de transmisión típicas en las bandas primarias.

Banda (MHz)	Sistemas presentes	BW de los canales (MHz)	Potencia de transmisión $\pm 3$ (dBm)	Sensibilidad de los PU (dBm)
800 – 902	Sistemas de telefonía móvil (estación base)	0.2	45	N/A
	Sistemas de telefonía móvil (teléfono)	0.2	27	-102
902 – 928	Banda ISM de los 33 cm.	12.5,25	30	-100
928 – 960	Sistemas de telefonía móvil (estación base)	0.2	45	N/A
	Sistemas de telefonía móvil (teléfono)	0.2	27	-102
960 – 1215	Navegación aeronáutica	1	55	-90
1215 – 1240	Radionavegación y radiolocalización, exploración espacial, GPS.	25	33	-130
1240 – 1300	Radiolocalización	10	33	-10
1300 – 1559	Varios sistemas móviles terrestres, aéreos y marítimos	10,24	33	-130
1559 – 1626.5	4 bandas de aeronavegación	20	55	-130
1626.5 – 1670	Sistemas móviles por satélite	24	39	-130
1670 – 2400	Bandas de telefonía móvil, investigación espacial, difusión vía satélite y exploración terrestre	20	24	-130
2400 – 2500	Banda ISM (Wi-Fi, Bluetooth)	1,2,20,40	0-33	- 89

De forma similar, la Figura 14 muestra el resultado de la simulación pero ahora para un ambiente en exteriores, en el que se considera la posibilidad de que un SU se aproxime a fuentes de transmisión primaria más intensas para algunos sistemas, como una estación base de telefonía celular; además se asume mayor actividad en las bandas de aeronavegación, radiolocalización, y exploración espacial.

Contrario a lo que podría pensarse, algunas de estas condiciones resultan más adecuadas para garantizar la seguridad de los PU porque sus niveles de potencia son mayores y permiten ubicar con mayor facilidad la  $P_{VCCC}$  20 dB por debajo sin exigir mayor sensibilidad a los TRx de control.

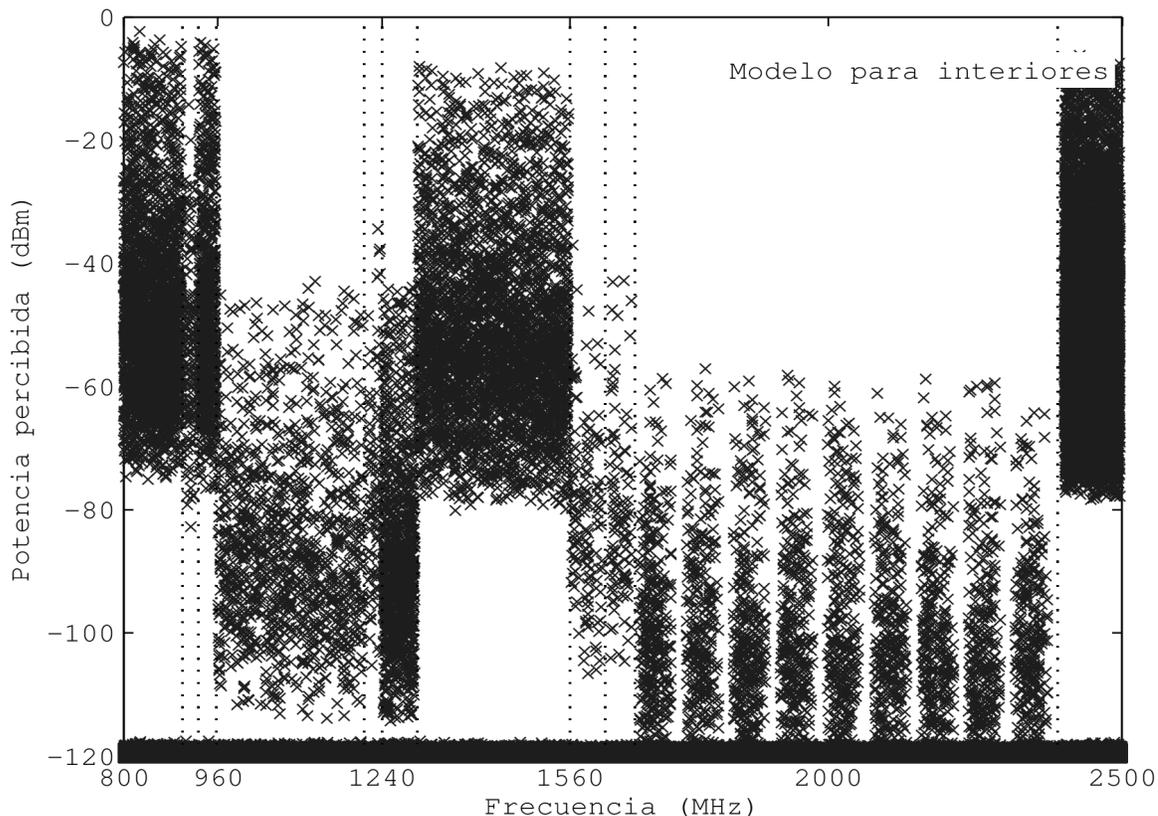


Figura 13. Simulación de la percepción espectral sobre todo el BW visible por el TRx de control de un SU en un ambiente de interiores. Las divisiones muestran la separación de bandas definida en el Cuadro 4.

Asimismo, algunas regiones, como la banda ubicada entre 960 y 1215 MHz registran altos niveles de potencia, y prácticamente cero detecciones por debajo de  $-80$  dBm, lo cual permite la operación de varios canales subyacentes con una potencia promedio cercana a  $-100$  dBm, o incluso  $-90$  dBm, sensibilidad típica de esos sistemas.

Es importante detenerse en este punto para considerar que todas las magnitudes de potencia de las que se ha hablado corresponden a valores medios, o promedios, de las percepciones efectuadas –o en nuestro caso, simuladas– por los SU. Por esta razón, conviene considerar algunos factores antes de explicar cuáles son, y cómo se establecen los umbrales que determinan la elección de una  $f_c$  y BW para un canal de control subyacente.

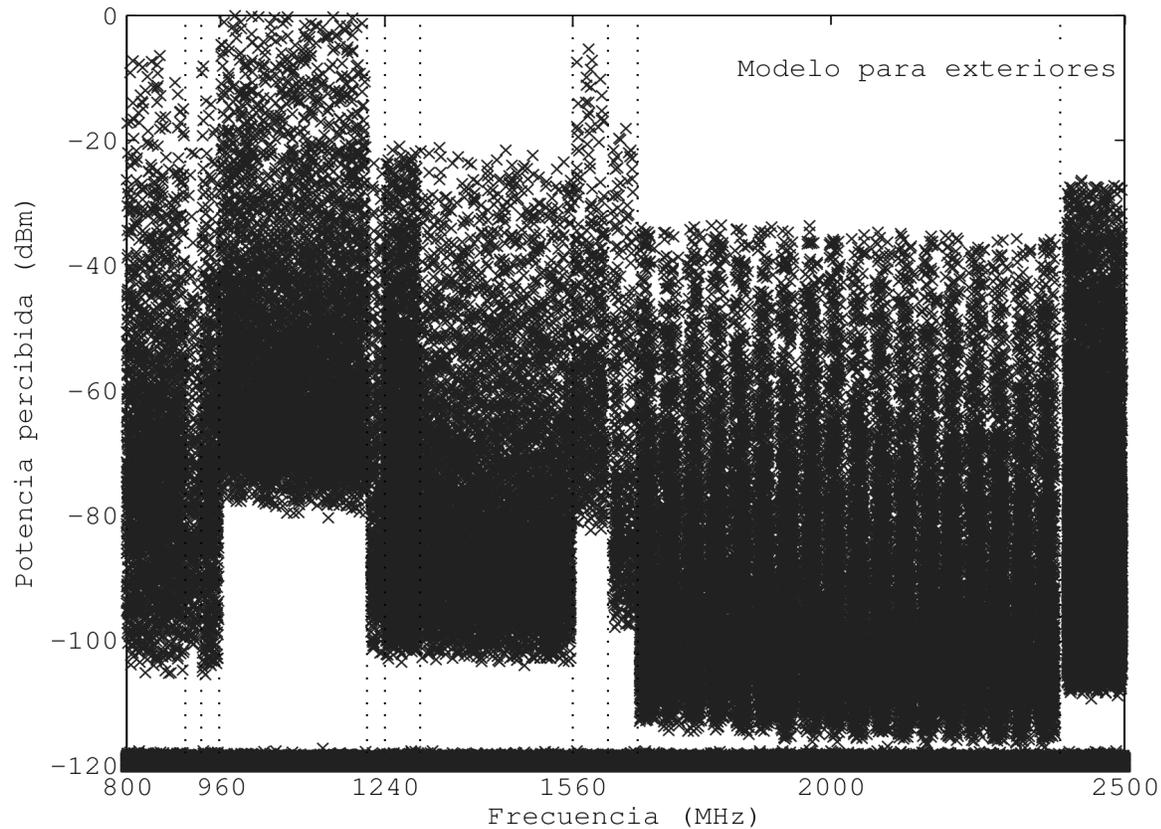


Figura 14. Simulación de la percepción espectral sobre todo el BW visible por el TRx de control de un SU en un ambiente de exteriores. Las divisiones muestran la separación de bandas definida en el Cuadro 4.

El primero de éstos es el valor medio de la potencia percibida en una banda de ancho  $BW_k$ , que depende de una sola percepción efectuada sobre éste y, por lo tanto, se calcula como el cociente de la suma de las potencias percibidas (incluyendo aquéllas en las que no hay presencia primaria y por ende ajustadas a  $-120$  dBm) con el número de muestras tomadas en el dominio de la frecuencia, definidas por la resolución del detector.

Por ejemplo, considérese que el BW de estudio es de 100 MHz y está centrado en una  $f_C$  igual a 1.45 GHz, y se utiliza el modelo para interiores. El cálculo devuelve una  $P_{PU}^m$  igual a  $-119.77$  dBm porque dominan los valores en los que no hay presencia de portadoras y se afirma que la banda elegida está libre de primarios. De hecho, en el instante simulado, sólo se encontró una portadora de  $-14.23$  dBm.

---

El segundo factor considera el valor promedio de la potencia percibida en cierta banda, y la diferencia con respecto al anterior radica en que el tiempo influye en su cálculo; en otras palabras, ya no se considera tan sólo una muestra de las percepciones, sino un conjunto de ellas, las cuales se asumen separadas un instante, denominado tiempo de muestreo ( $t_s$ ). Si se retoma el ejemplo del párrafo anterior, es necesario contar con más muestras para determinar el promedio de las percepciones primarias, en este caso cinco. En seguida se toma el valor medio de cada una de las muestras y se obtiene su media, lo cual produce una  $P_{PU}^m$  de  $-119.78$  dBm, valor que también sugiere que la ocupación de la banda estudiada es prácticamente nula, y puede asumirse libre. Aquí cabe mencionar que el modelo propuesto considera que las percepciones son eventos aleatorios independientes; sin embargo, en la realidad esto podría ser diferente, porque mientras más cercana sea una muestra de otra, la probabilidad de que un canal ocupado continúe de ese modo se incrementa porque las transmisiones tienen una duración finita mayor que cero.

El tercer y último factor considera la exclusión de las detecciones primarias en las que se mide el ruido de piso —o la ausencia de transmisiones—, de tal forma que se cuente con información menos sensible a la densidad de ocupación primaria, y en su lugar se describa mejor cómo es que los PU utilizan la banda de interés cuando efectivamente transmiten. Si de nuevo se recurre al ejemplo de los párrafos anteriores, primero deben obtenerse los valores de la potencia percibida mayores a  $-120$  dBm para calcular su promedio. Además, para evitar falsas detecciones de portadoras cercanas al ruido de piso se define un intervalo de incertidumbre de  $3$  dBm. De este modo, el promedio de las cinco muestras de las percepciones primarias efectivas, tomadas entre  $1.4$  y  $1.5$  GHz, resulta igual a  $-45.41$  dBm, valor que caracteriza mejor cómo son las transmisiones primarias que ocurren en promedio en esa banda. Además, el cálculo de este último factor ayuda a establecer el nivel máximo de potencia para los canales subyacentes y permite estimar su

tasa de transferencia. Por ejemplo, si se recurre a (3) para analizar la capacidad de un UCCC con un BW de 100 MHz y una  $P_{PU}^m$  de  $-45.41$  dBm, el cual mantiene la  $\text{SNIR}_{\text{UCCC}}$  en  $-20$  dB, es posible afirmar que la máxima tasa de transferencia en dicho canal será ligeramente superior a 1 Mb/s, lo cual implica una  $P_{\text{UCCC}}$  de  $-65.41$  dBm.

### 4.3. Umbrales de operación de los canales subyacentes

Como ya se mencionó en párrafos previos, los SU requieren métricas que les permitan definir el nivel máximo de potencia para la transmisión de sus mensajes de control, y así asegurar la protección de las comunicaciones primarias; no obstante, también es fundamental que sus canales subyacentes aseguren una tasa de transmisión de 100 kb/s para que la información transportada sea útil durante la elección de los huecos en los canales primarios sobre los cuales se efectúan las transmisiones de datos. Además, los SU deben negociar la eventual reubicación de sus canales subyacentes en bandas que disminuyan el riesgo de interferir de forma nociva las comunicaciones primarias, o bien en bandas que mejoren la tasa de transmisión de sus mensajes de control.

Cuando algún SU crea una CRAHN, debe establecer la  $f_c$  y potencia de su UCCC, basado en el cálculo –o mejor dicho, en la estimación– de su  $\text{SNIR}_{\text{UCCC}}$ . La primera percepción espectral efectuada por el SU barre todo el BW observable y determina dos umbrales, *el umbral de protección primaria*, encargado de mantener protegidas las comunicaciones primarias; y *el umbral de conexión secundaria*, cuya función consiste en asegurar una tasa de transmisión suficiente. La idea fundamental es mantener la potencia del UCCC dentro de estos dos umbrales durante el mayor tiempo posible; pero, cuando esa tarea no puede consumarse el canal subyacente se ubica en alguna otra banda que proporcione mejores condiciones de operación y protección.

Por simplicidad, se asume que el BW de los canales subyacentes es fijo, aunque no existe limitación alguna para que se adapte a las condiciones espectrales. Los dos umbrales se explican en seguida.

### 4.3.1. Umbral de protección primaria

Su cálculo emplea la potencia media de las transmisiones efectivas de los PU; un SU colecciona muestras de sus percepciones espectrales sobre un BW determinado y descarta las potencias percibidas cuyo valor se considera una ausencia de transmisión, normalmente asociado al ruido de piso, cercano a  $-120 \pm 3$  dBm; en seguida calcula su valor medio y le sustrae dos veces su desviación estándar más 20 dB. Su expresión matemática se muestra en (7),  $P_{PT}$  corresponde a la potencia del umbral de protección,  $P_{PU}^m$  y  $\sigma P_{PU}^m$  son, respectivamente, el valor medio y la desviación estándar de las transmisiones efectivas de los PU sobre el ancho de banda del canal de control subyacente.

$$P_{PT} \text{ dBm} = P_{PU}^m \text{ dBm} - 2\sigma P_{PU}^m \text{ dBm} - 20 \text{ dB} \quad (7)$$

Para ejemplificar la obtención de este umbral se recurrió al modelo de simulación en interiores de la ocupación de los canales primarios. La  $f_c$  se fijó en 1.335 GHz y se simularon diez percepciones por cada muestra, se tomaron 500 muestras para integrar una ventana de muestreo, la estimación de  $P_{PU}^m$  se obtuvo mediante la media aritmética de los resultados de diez ventanas de muestreo. Una vez que se obtuvieron  $P_{PU}^m$  y su desviación estándar ( $\sigma P_{PU}^m$ ), el cálculo del umbral de protección se efectuó según se indica en (7). La Figura 15 presenta el umbral de protección, como una función del ancho de banda del canal de control subyacente y la carga de las redes primarias. Dado que el cómputo del umbral de protección no depende de las percepciones primarias nulas, la carga de las redes primarias resulta irrelevante; dicho de otro modo, la potencia de este umbral se mantiene constante ante la carga de las redes primarias porque

solamente considera las transmisiones efectivas. Su valor depende principalmente de la tecnología de los UP y la distancia a la que se ubican del receptor secundario.

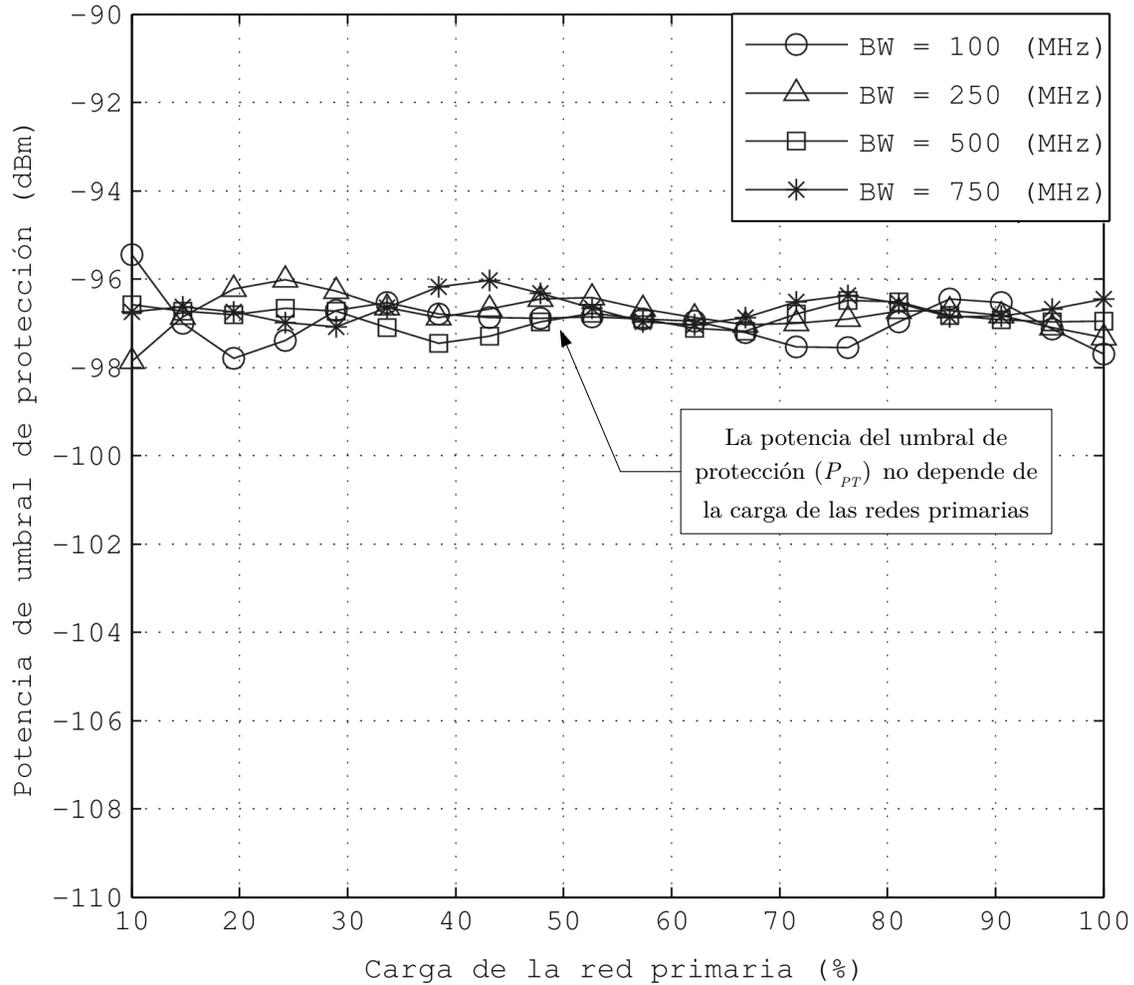


Figura 15. Potencia del umbral de protección primaria ( $P_{PT}$ ). Puede observarse que al no depender de las detecciones nulas, la carga de las redes primarias no influye en su valor. Su valor se ajusta dos desviaciones estándar y 20 dB por debajo de  $P_{PU}^m$ .

### 4.3.2. Umbral de conexión secundaria

Este umbral determina la potencia mínima que asegura una tasa de transmisión aceptable, establecido arbitrariamente en 100 kb/s por ser similar a la de otros sistemas inalámbricos. Su cálculo se realiza mediante la determinación del valor máximo para  $P_{UCCC}$  o  $P_{ULCC}$ , según el tipo de canal que se desee establecer.

---

Para calcular la potencia del umbral de conexión secundaria ( $P_{CT}$ ) se necesita despejar la SNIR de (2), y definir el valor mínimo que garantiza la capacidad de canal deseada, en función del BW elegido. Una vez que se tiene este parámetro, se considera el promedio de las potencias percibidas sin excluir los huecos, con la finalidad de determinar si la densidad de PU se mantiene alta, al menos  $-115$  dBm, o se parece más al ruido de piso.

En el primer caso, el valor obtenido se sustituye por el denominador de (3) o (4), de modo que se pueda calcular  $P_{VCCC}$  o  $P_{ULCC}$  según corresponda. Por un lado, cuando la magnitud calculada es menor que la sensibilidad del TRx de control de los SU, ésta se fija a  $-110$  dBm porque incluso la mínima potencia utilizada en los canales subyacentes es suficiente para garantizar la tasa de transmisión requerida; no obstante, se corre el riesgo de interferir sistemas inalámbricos que son capaces de operar con potencias menores a la sensibilidad de los SU. Por otro lado, si el valor obtenido es mucho mayor que la sensibilidad de los TRx secundarios (al menos 10 dB por arriba), éste se asigna directamente a la potencia del umbral,  $P_{CT}$ .

A diferencial del umbral de protección primaria, el umbral de conexión secundaria se ve afectado por la carga de las redes primarias porque una mayor concentración de transmisiones primarias provoca la disminución de la SNIR del canal subyacente y obliga el incremento de su potencia para mantener la misma tasa de transmisión, tal como se muestra en la Figura 16.

Por estas razones, la potencia utilizada por los canales subyacentes debe ser siempre mayor que  $P_{CT}$ , porque de otro modo no podría asegurarse que su capacidad de canal puede proporcionar 100 kb/s y, por ende, que los mensajes de control transmitidos sean lo suficientemente rápidos para coordinar las transmisiones de datos en los huecos dejados por los UP.

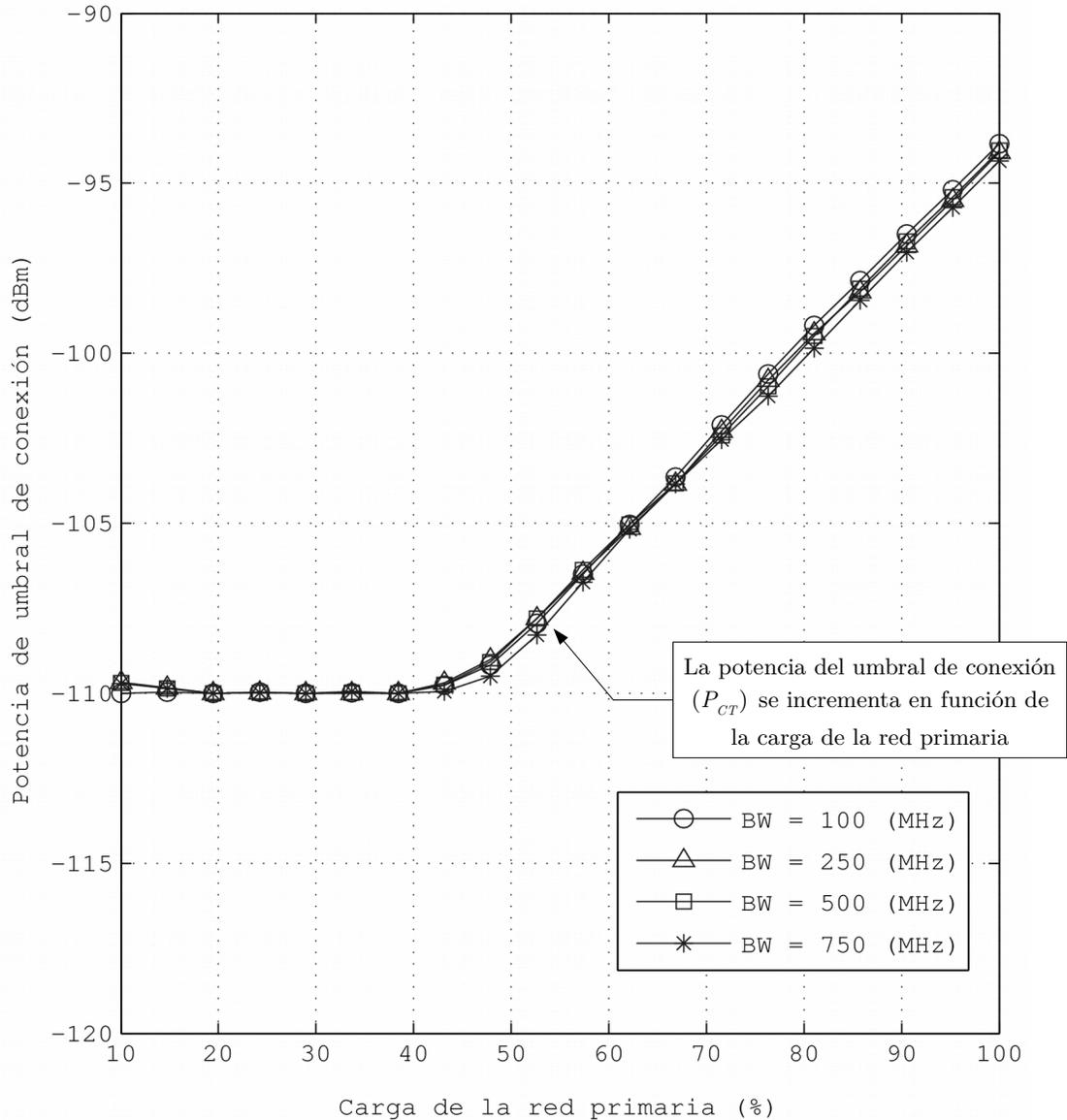


Figura 16. Potencia del umbral de conexión ( $P_{CT}$ ). A diferencia del anterior, este umbral depende de la carga de las redes primarias porque una mayor concentración de PU obliga el incremento de la potencia de los canales subyacentes para mantener la tasa de transmisión deseada (100 kb/s).

#### 4.4. Reubicación dinámica de los canales subyacentes

Los criterios utilizados para establecer la  $f_c$  de un nuevo UCCC o ULCC son similares a los de su reubicación, y se basan en los umbrales definidos en las secciones anteriores. En pocas palabras, un canal subyacente siempre debe mantener su potencia promedio entre

los umbrales de protección y de conexión; cuando esto no es posible, un conjunto de dos o más SU eligen una nueva  $f_c$ , de acuerdo con los resultados de sus percepciones espectrales. El único caso que no requiere la participación de varios nodos es la creación de un nuevo UCCC porque lo genera un solo SU, basado en los resultados de sus percepciones individuales; posteriormente, la adhesión de otros nodos obligará su coordinación para gestionar cualquier posible reubicación. La Figura 17 muestra estas ideas.

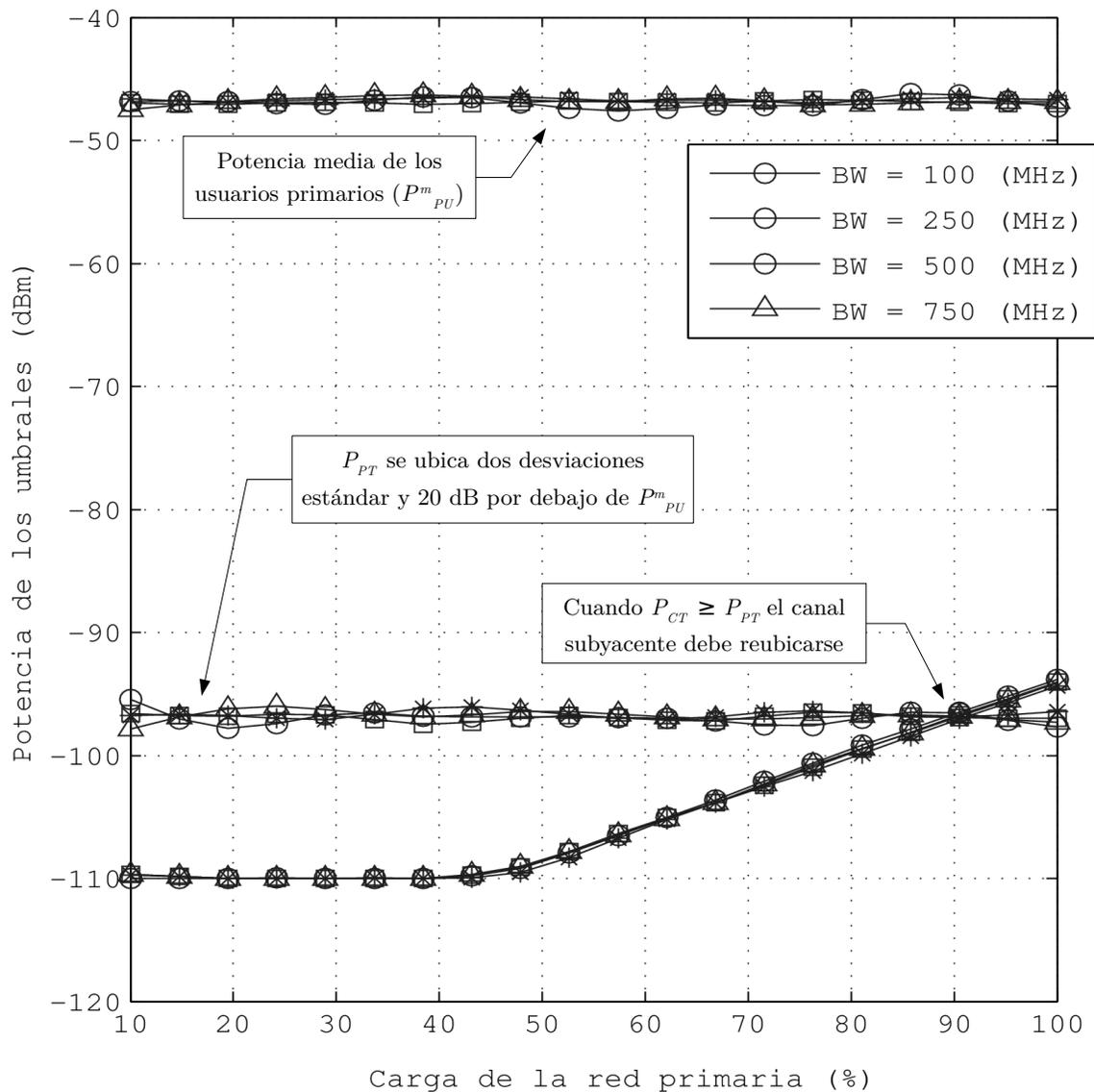


Figura 17. Criterio para la reubicación de los canales de control. Cuando  $P_{CT} \geq P_{PT}$  el canal subyacente debe ubicarse en otra banda, de modo que las condiciones de operación sean las adecuadas.

El punto crítico de la Figura 17 en el que  $P_{CT} = P_{PT}$  se obtuvo mediante simulaciones, con el modelo descrito en la sección 4.2; se observa que a partir de una carga de 90% de las redes primarias sobre el ancho de banda del canal subyacente se tienen condiciones de operación no deseables y su reubicación es necesaria. Para medir el impacto que dichas reubicaciones tienen en el desempeño de los canales de control, la Figura 18 muestra el número de ocasiones en las que las condiciones de operación no eran las adecuadas, o en otras palabras, las veces de el canal debió saltar a otra banda espectral.

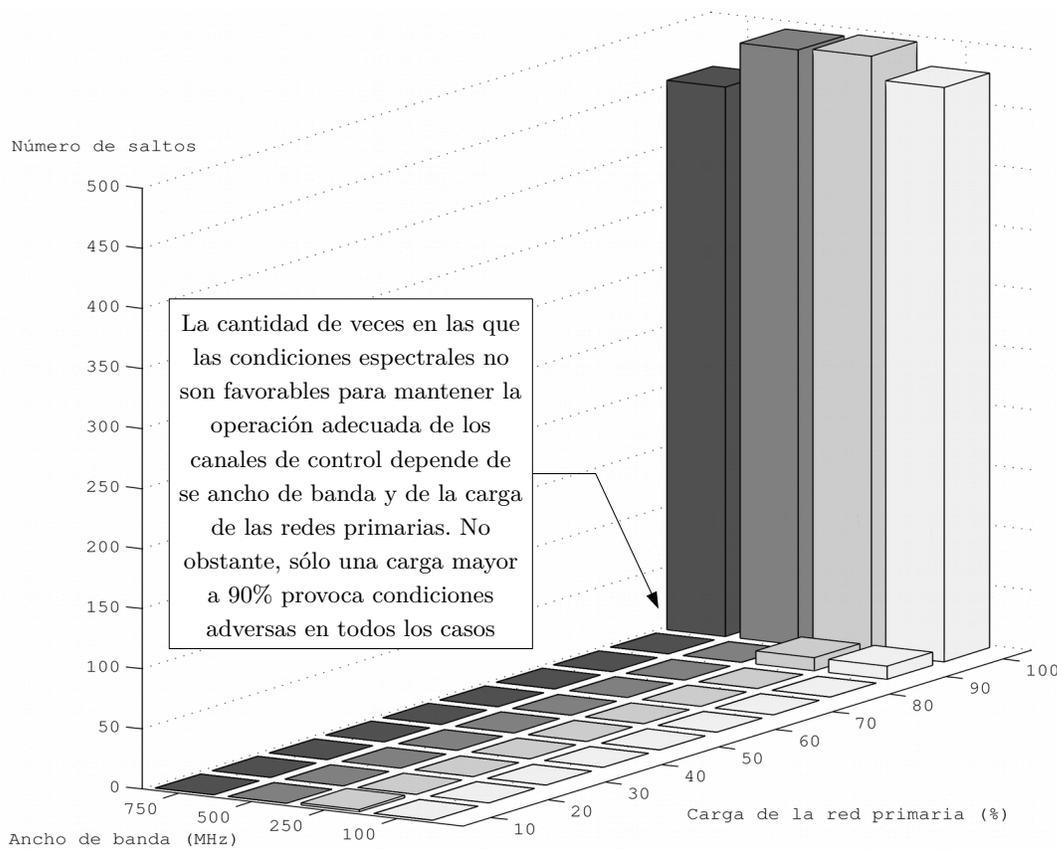


Figura 18. Se muestra el número de veces en las que no se tuvieron condiciones favorables para el correcto funcionamiento de los canales de control subyacentes, en función de su ancho de banda y de la carga de las redes primarias sobre éstos.

Como puede observarse, sólo durante condiciones extremas es necesario efectuar reubicaciones de los canales de control, en este caso una carga de las redes primarias superior a 90%, ya que su rendimiento baja considerablemente. No obstante, esta habili-

---

dad permite a los SU mantener un escenario más confiable aun en condiciones extremas, ya que al migrar a otra banda con mejores condiciones de operación se reducen los efectos negativos.

Asimismo, dado que un canal subyacente sólo cambia su  $f_c$  cuando los umbrales de conexión y protección son iguales o se traslapan, deben considerarse los factores que provocan esta situación. Dichos factores dependen tanto de los PU, de acuerdo con su potencia de transmisión, carga de red y sensibilidad de sus receptores; como de los US, en función de la tasa mínima de transmisión permitida, la distancia a la que se encuentran de los transmisores primarios y la sensibilidad de su TRx de control. Además, estos factores son evaluados de forma dinámica por cada SU durante la determinación de sus umbrales.

En particular, la sensibilidad de los receptores primarios podría llevar a la detección de bandas aparentemente vacías, en las que realmente ocurren transmisiones cuya potencia no es visible por los SU. Desafortunadamente, lo único que puede hacerse, si se descarta la posibilidad de contar una mayor sensibilidad en los receptores secundarios, es permitir que los usuarios de la CRAHN marquen regiones del espectro como prohibidas, de modo que no se utilicen aun cuando se perciban desocupadas. Un análisis experimental del uso del espectro radioeléctrico podría establecer zonas seguras; por ejemplo, en el interior de un edificio de oficinas, alejado de alguna estación aérea, podrían efectuarse transmisiones secundarias sobre las bandas de aeronavegación de forma segura.

Por último, se requiere que los TRx de control efectúen el menor número de retransmisiones posibles, de modo que la información obtenida de las oportunidades espectrales provocadas por los huecos sea relevante. Por esta razón, la Figura 19 presenta la BER de los canales de control subyacentes, modulados con QPSK, para una tasa de transmisión igual a 100 kb/s, en función de su SNIR y BW. Se observa que es necesario incrementar el BW para mantener las transmisiones subyacentes por debajo del umbral de

protección y lograr la tasa requerida. El valor máximo de la BER, considerado aceptable, es  $10^{-5}$ , debido a que se transmiten exclusivamente mensajes de control (de longitud corta); no obstante, si ésta es menor a  $10^{-6}$  se proporciona mucho más fiabilidad a la red cognitiva.

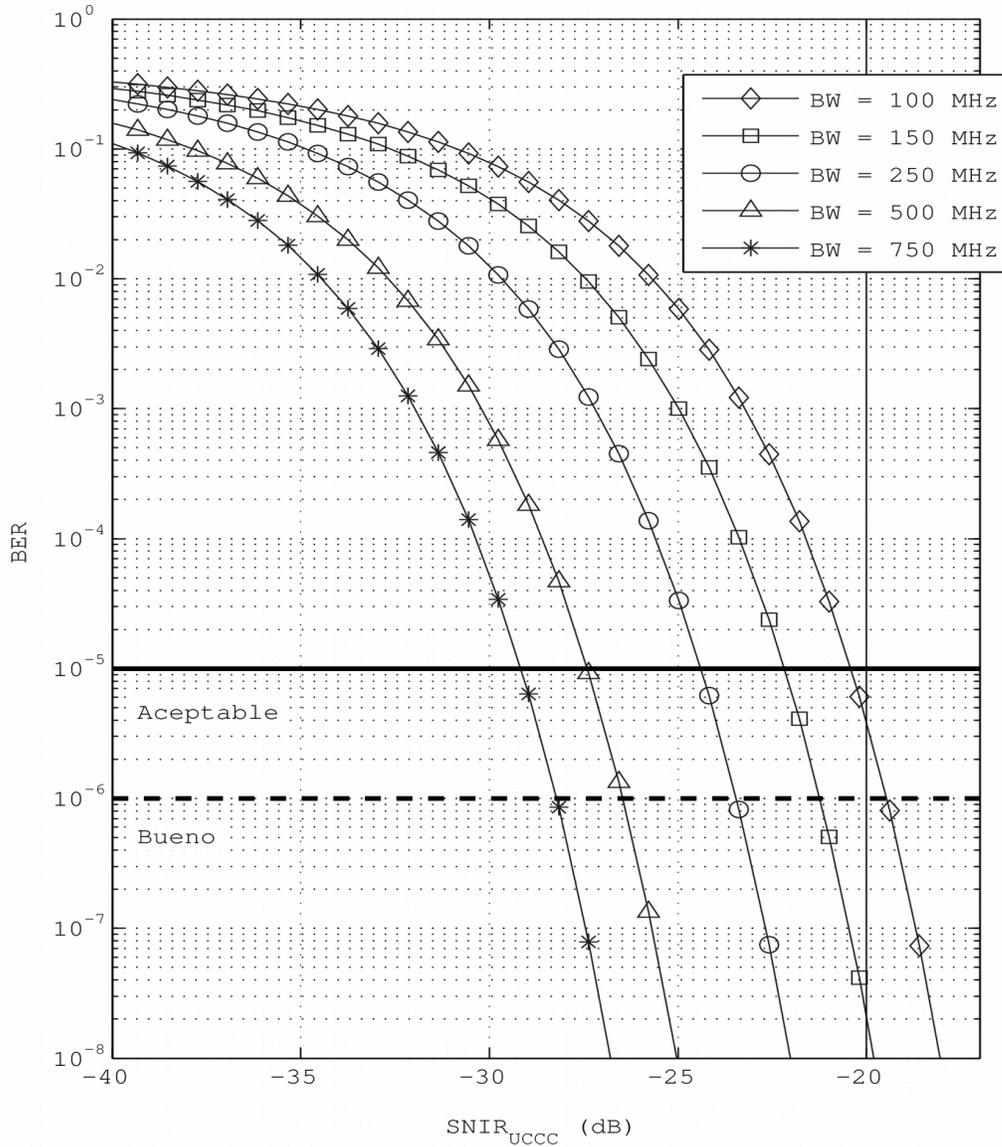


Figura 19. Tasa de bits erróneos para los canales subyacentes en función de su BW. Se utiliza una modulación QPSK y se asume que la tasa de transmisión es 100 kb/s. Una BER por debajo de  $10^{-5}$  se considera aceptable para transmitir de manera fiable los mensajes de control; sin embargo, se prefiere que ésta sea menor a  $10^{-6}$ .

---

## Capítulo 5

# Conclusiones

---

Se propuso la utilización de dos tipos de canales de control subyacentes con CDMA, basados en una técnica de espectro expandido por secuencia directa, capaces de cambiar su frecuencia de portadora para elegir alguna banda en la que su potencia pueda mantenerse siempre dentro de los umbrales de protección primaria y conexión secundaria. Uno de estos canales, el canal subyacente de control común (UCCC) está disponible a todos los nodos de la red cognitiva y permite la coordinación global; el otro tipo de canal subyacente se integra por un conjunto de canales locales (ULCC) creados de forma dinámica por los nodos secundarios cada vez que se requiere gestionar el acceso oportunista a las bandas primarias.

Si la potencia de los canales de control se mantiene dentro de los umbrales de protección y conexión, la red secundaria será capaz de coexistir con las comunicaciones primarias y de mantener una tasa de transmisión suficiente para administrar el acceso oportunista a los huecos dejados por las transmisiones primarias. Dichos umbrales fueron determinados mediante un modelo de simulación de la ocupación espectral primaria.

Aun cuando la posibilidad de coordinar redes cognitivas *ad hoc* mediante canales de control subyacentes ha sido reportada en la literatura, el esquema aquí propuesto es inédito; asimismo, no se han reportado análisis de viabilidad ni mecanismos similares para definir la potencia de los umbrales de protección primaria y conexión secundaria.

Como trabajo futuro se pretende calcular los umbrales de operación con datos obtenidos experimentalmente, e implementar los canales propuestos en dispositivos electrónicos SDR.



# Referencias

---

- [1] Antonio De Domenico *et al.*, “A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, núm. 1, pp. 21-44, enero-marzo, 2012.
- [2] Joseph Mitola III y Gerald Q. Maguire Jr., “Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal,” *IEEE Personal Communications*, vol. 6, núm. 4, pp. 13-18, agosto, 1999.
- [3] Simon Haykin, “Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, núm. 2, pp. 201-220, febrero, 2005.
- [4] Andrea Goldsmith *et al.*, “Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, núm. 5, pp. 894-914, mayo, 2009.
- [5] Don Torrieri, “Direct-Sequence Systems,” en *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*, Boston, Estados Unidos, Springer Science, 2005, 55-58.
- [6] Qing Zhao, Lang Tong y Ananthram Swami, “Decentralized Cognitive MAC for Dynamic Spectrum Access,” en *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, Estados Unidos, noviembre, 2005, pp. 224-232.
- [7] Abdullah Masrub *et al.*, “Cognitive Radio Based MAC Protocols for Wireless ad hoc Networks,” en *Developments in E-systems Engineering (DeSE)*, Dubai, Emiratos Árabes Unidos, diciembre, 2011, pp. 465-469.
- [8] Hang Su y Xi Xiang, “Cross-Layer Based Opportunistic MAC Protocols for QoS Provisionings Over Cognitive Radio Wireless Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, núm. 1, pp. 118-129, enero, 2008.
- [9] Haythem A. Bany Salameh *et al.*, “MAC Protocol for Oppotunistic Cognitive Radio Networks with Soft Guarantess,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, núm. 10, pp. 1339-1352, octubre, 2009.
- [10] Chao Zou y Chunxiao Chigan, “A Game Theoretic DSA-Driven MAC Framework for Cognitive Radio Networks,” en *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Beijing, China, mayo, 2008, pp. 4165-4169.
- [11] Qian Chen *et al.*, “A Two-Level MAC Protocol Strategy for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, núm. 5, pp. 2164-2180, junio, 2011.
- [12] Jesús Hernandez-Guillen *et al.*, “CRUAM-MAC: A Novel Cognitive Radio MAC protocol for Dynamic Spectrum Access,” en *IEEE Latin-America Conference on Communications (LATINCOM)*, Cuenca, Ecuador, noviembre, 2012, pp. 1-6.
- [13] Jun Zhao *et al.*, “Distributed Coordination Dynamic Spectrum Allocation Networks,” en *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, Estados Unidos, noviembre, 2005, pp. 259-268.
- [14] Yi Tang *et al.*, “Multichannel Non-persistent CSMA MAC Schemes with Reinforcement Learning for Cognitive Radio Networks,” en *International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, Hangzhou, China, octubre, 2011, pp. 502-506.

- [15] Ian F. Akyildiz *et al.*, “CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, núm. 5, pp. 810-836, julio, 2009.
- [16] Bechir Hamdaoui y Kang G. Shin, “OS-MAC: An Efficient MAC Protocol for Spectrum-Agile Wireless Networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, núm. 8, pp. 915-929, agosto, 2008.
- [17] Sarena Bao y Takeo Fujii, “Q-Learning Based p-persistent CSMA MAC Protocol for Secondary User of Cognitive Radio Networks,” en *International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS)*, Fukuoka, Japón, noviembre-diciembre, 2011, pp. 336-337.
- [18] Wha Sook Jeon *et al.*, “A Novel MAC Scheme for Multichannel Cognitive Radio Ad Hoc Networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 11, núm. 6, pp. 922-934, junio, 2012.
- [19] Lianping Ma *et al.*, “Single-Radio Adaptive Channel Algorithm for Spectrum Agile Wireless Ad Hoc Networks,” en *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Dublín, Irlanda, abril, 2007, pp. 547-558.
- [20] Xi Zhang y Hang Su, “CREAM-MAC: Cognitive Radio-Enabled Multi-Channel MAC Protocol Over Dynamic Spectrum Access Networks,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, núm. 1, pp. 110-122, febrero, 2011.
- [21] Lianping Ma *et al.*, “Dynamic Open Spectrum Sharing MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks,” en *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Baltimore, Estados Unidos, noviembre, 2005, pp. 203-213.
- [22] Yun Li *et al.*, “A Distributed Cooperative MAC for Cognitive Radio Ad-hoc Networks,” en *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Corfú, Grecia, junio-julio, 2011, pp. 1038-1043.
- [23] Carlos Cordeiro y Kiran Challapali, “C-MAC: A Cognitive MAC Protocol for Multi-Channel Wireless Networks,” en *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Dublín, Irlanda, abril, 2007, pp. 147-157.
- [24] Yun Li *et al.*, “A MAC Protocol Supporting Dynamic Control Channel for Cognitive Radio Ad Hoc Networks,” en *International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, Ningbo, China, septiembre, 2011, pp. 37-40.
- [25] Juncheng Jia *et al.*, “HC-MAC: A Hardware-Constrained Cognitive MAC for Efficient Spectrum Management,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, núm. 1, pp. 106-117, enero, 2008.
- [26] Ming Zhao *et al.*, “A Novel Dynamic Spectrum Access Algorithm for Cognitive Radio Networks,” *Journal of Communications and Networks*, vol. 15, núm. 1, pp. 38-44, febrero, 2013.
- [27] Nicola Baldo *et al.*, “Multi-Channel Medium Access using a Virtual Coded Control Channel,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, núm. 8, pp. 2575-2587, agosto, 2010.
- [28] Kuo-Chun Huang y Dipankar Raychaudhuri, “MAC Protocol Adaptation in Cognitive Radio Networks,” en *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Cancún, México, marzo, 2011, pp. 245-250.
- [29] Kaveh Ghaboosi *et al.*, “A Distributed Multi-channel Cognitive MAC Protocol for IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks,” en *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom)*, Singapur, Singapur, mayo, 2008, pp. 1-8.
- [30] Yogesh R Kondareddy y Prathima Agrawal, “Synchronized MAC Protocol for Multi-hop Cognitive Radio Networks,” en *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Beijing, China, mayo, 2008, pp. 3198-3202.

- [31] Marco Petracca *et al.*, “An Always Available Control Channel for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks,” en *IFIP Wireless Days (WD)*, Venecia, Italia, octubre, 2010, pp. 1-5.
- [32] Marco Petracca *et al.*, “Opportunistic Spectrum Access based on Underlay UWB Signalling,” en *IEEE International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB)*, Bolonia, Italia, septiembre, 2011, pp. 180-184.
- [33] Tao Chen *et al.*, “CogMesh: A Cluster-based Cognitive Radio Network,” en *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Dublín, Irlanda, abril, 2007, pp. 168-178.
- [34] Shadi Ebrahimi Asl y Bahman Abolhassani, “Primary Interference Suppression in Secondary Underlay Transmission Using Direct Sequence Spread Spectrum,” en *International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSyN)*, Indore, India, julio, 2009, pp. 108-113.
- [35] Michael Timmers *et al.*, “A Distributed Multichannel MAC Protocol for Multihop Cognitive Radio Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, núm. 1, pp. 446-459, enero, 2010.
- [36] Mustafa E. Sahin y Hüseyin Arslan, “System Design for Cognitive Radio Communications,” en *International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom)*, Isla Míconos, Grecia, junio, 2006, pp. 1-5.
- [37] Daryl Leon Wasden *et al.*, “Design and Implementation of an Underlay Control Channel for Cognitive Radios,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, núm. 10, pp. 1875-1889, noviembre, 2012.
- [38] Salvador Perez-Salgado *et al.*, “Underlay control channel using adaptive hybrid spread spectrum techniques for dynamic spectrum access,” en *International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS)*, Toronto, Canadá, julio, 2013, pp. 99-106.
- [39] Andrew Tanenbaum y David Wetherall, “The OSI Reference Model,” en *Computer Networks*, 5a ed., Boston, Estados Unidos, Pearson Education Inc. (Prentice Hall), 2011, 43-44.
- [40] Andrea Goldsmith, “Path Loss and Shadowing,” en *Wireless Communications*, Stanford, Estados Unidos, Cambridge University Press, 2005, 28-45.
- [41] Claude E. Shannon, “Communication in the presence of noise,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 72, núm. 9, pp. 1192-1201, septiembre, 1984.
- [42] Ian Poole, “GSM Radio Air Interface, GSM Slot & Burst,” <http://www.radio-electronics.com>, (consultado en enero de 2014).
- [43] Administración Nacional de Tecnología e Información (Oficina de Administración del Espectro), *US Frequency Allocation Chart Covering the range 3 kHz to 300 GHz*, Comisión Federal de Comunicaciones: Departamento de Comercio, 2011.
- [44] Procuraduría Federal del Consumidor, “Estudio de calidad en teléfonos celulares,” *Revista del consumidor*, núm. 284, octubre, 2000.
- [45] Estándar IEEE para tecnología de la Información, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” en *Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements*, IEEE Standard 802.11, 2012.
- [46] Comisión Federal de Comunicaciones, *Telecommunication*, Código Federal Norteamericano de Regulaciones, Estados Unidos de América, 2012.