



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Control Adaptativo de Admisión e Interferencia en redes de Radio Cognitiva con Tráfico Elástico

Autor: Pedro Juan Roig Roig

Director: Jorge Martínez Bauset

Fecha de comienzo: 07/02/2012

Lugar de trabajo: Departamento de Comunicaciones

Objetivos —

El objetivo de este trabajo es el diseño de un sistema de control de tráfico adaptativo para limitar la interferencia que la operación de los usuarios secundarios causa sobre los usuarios primarios en redes de radio cognitiva. Para los secundarios, se supone la existencia de una entidad centralizada o distribuida que realiza la asignación de canales. Aunque existe un número considerable de trabajos que abordan el análisis de la interferencia en redes de radio cognitiva desde la perspectiva del tráfico, no se conocen otros trabajos en los que se hayan estudiado esquemas adaptativos cuando el tráfico de los primarios es de tiempo real (voz) y el de los secundarios es elástico (datos).

Metodología —

Para la realización de este trabajo se han desarrollado 2 algoritmos adaptativos con los cuales se ha modelado el sistema descrito anteriormente. Ello ha permitido evaluar su comportamiento mediante simulaciones con diferentes procesos de llegada de sesiones y con diferentes distribuciones de longitud de los flujos elásticos (en bits). Los resultados del modelo de simulación se han validado de forma preliminar con los resultados de un modelo analítico sencillo, basado en procesos de Markov en tiempo continuo.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio —

Se han desarrollado 2 algoritmos de Control de Admisión Adaptativos en base a la librería SMPL para la simulación de eventos discretos. Los parámetros adaptativos son el número máximo de canales a los cuales pueden acceder los usuarios secundarios y el número máximo de flujos secundarios que pueden acceder al sistema al mismo tiempo. Ambos parámetros se van ajustando a lo largo de la simulación en base a las características del tráfico recibido, para cumplir unos objetivos de rendimiento preestablecidos. La diferencia entre ambos algoritmos es que uno de ellos deja un canal de guarda para evitar las interferencias a los usuarios primarios, mientras que el otro algoritmo no lo hace.

Resultados —

Ambos algoritmos cumplen con los objetivos de rendimiento estipulados, mejorando sustancialmente los resultados obtenidos sin mecanismos de control de admisión. La diferencia entre ambos es que el algoritmo que deja un canal de guarda no ofrece interferencias, pero como contrapartida ofrece un throughput ligeramente inferior debido a que el canal de guarda no se puede utilizar para transmitir datos.

Líneas futuras —

En este trabajo se ha considerado que cuando un usuario primario llega a un canal, automáticamente es detectado por los usuarios secundarios que están ocupando ese canal y se procede inmediatamente al abandono de éste mediante el mecanismo de handover espectral. Este hecho no es del todo cierto, ya que los usuarios secundarios realizan un sensado del canal cada cierto tiempo. Esto implica que si un usuario primario llega a un canal durante dicho intervalo de sensado, será detectado por los usuarios secundarios, pero si llega fuera de ese intervalo, entonces no será detectado hasta el siguiente intervalo. Una posible línea de ampliación de este trabajo sería modificar el código para reflejar este hecho, lo cual ofrecerá resultados más cercanos a la realidad.

Abstract —

The scope of this study is to design an adaptive admission control system to limit the interference caused by the unlicensed or secondary users to the licensed or primary users on cognitive radio networks. This mechanism allows to set an objective for interference probability beforehand, assuring a certain level of quality of service to the primary users. On the other hand, an objective for abandonment probability is also established to the secondary users due to impatience, assuring as well a certain level of quality of service to them, as it is more disturbing to be cut in the middle of a transmission than to be banned from starting it.

Although there are several studies about interference analysis on cognitive radio from a traffic perspective, it is the first one using adaptive schemes when the primary traffic is real time (voice) and the secondary traffic is elastic (data).

Autor: Pedro Juan Roig Roig, email: pedrojroig@hotmail.com

Director 1: Jorge Martínez Bauset, email: jmartinez@upvnet.upv.es

Fecha de entrega: 17-09-12

ÍNDICE

I. Introducción a la Radio Cognitiva	5
I.1. Motivación.....	5
I.2. Evolución.....	6
I.3. Características básicas	7
I.4. Redes de Area Regional.....	10
II. Desafíos de la Radio Cognitiva en el año 2012	11
II.1. Sensado	11
II.2. Seguridad.....	13
II.3. Economía.....	15
II.4. Enrutamiento en Redes Ad-Hoc	16
III. Estado del arte de la Radio Cognitiva desde el punto de vista del tráfico	18
III.1. Acceso Dinámico al Espectro.....	18
III.2. Modelo de tráfico streaming en la Red Primaria y en la Red Secundaria.....	19
III.3. Modelo de tráfico streaming en la Red Primaria y tráfico elástico en la Secundaria ..	21
IV. Estudio de un simulador de Radio Cognitiva con Control de Acceso Adaptativo	24
IV.1. Lenguaje de simulación utilizado: SMPL	24
IV.2. Presentación del escenario a simular.....	25
IV.3. Implementación del modelo Adaptativo general.....	27
IV.4. Implementación del modelo Adaptativo con canal de guarda	30
V. Resultados.....	31
VI. Conclusiones.....	38
Agradecimientos.....	39
Referencias	39

ÍNDICE de FIGURAS

Fig. 1: Utilización ineficiente del Espectro en una banda licenciada.....	5
Fig. 2: Concepto de Agujero Espectral.....	6
Fig. 3: Clasificación de estándares IEEE 802 por área de cobertura.....	7
Fig. 4: Arquitectura de red para un mecanismo de control centralizado	16
Fig. 5: Línea de base, sin control de admisión.....	32
Fig. 6: Algoritmo adaptativo general, con $B^{if}=0.01$ y $B^{ab}=0.01$	33
Fig. 7: Algoritmo adaptativo general, con distintos objetivos de probabilidad.....	33
Fig. 8: Validación del algoritmo adaptativo a través de R y F.....	34
Fig. 9: Validación del algoritmo adaptativo a través de P^{if} y P^{ab}	35
Fig. 10: Algoritmo adaptativo con canal de guarda, con $B^{if}=0.01$ y $B^{ab}=0.01$	36
Fig. 11: Comparación entre el rendimiento con acceso CAP y CAP con repacking.....	37
Fig. 12: Comparación entre el rendimiento en los algoritmos Con o Sin canal de guarda.....	38

I. INTRODUCCIÓN A LA RADIO COGNITIVA

I.1. MOTIVACION

El auge en el desarrollo de nuevos servicios inalámbricos en los últimos años es innegable. Cada vez con más frecuencia aparecen nuevas tecnologías inalámbricas que mejoran las ya existentes, o por otra parte, las complementan.

Dichas aplicaciones inalámbricas necesitan de recursos espectrales para poder ser implementadas, pero por contra, la mayor parte del espectro electromagnético ha sido ya adjudicado, principalmente mediante concesiones o subastas. Esto hace que gran parte de los servicios de radiofrecuencia existentes deban compartir las mismas bandas disponibles, provocando una saturación en las mismas, lo cual implica una degradación del servicio ofrecido.

Esta situación tenderá a empeorar con el paso del tiempo, ya que a los servicios inalámbricos ya existentes, hay que unir la previsible aparición de otros nuevos, que ante la escasez de espectro sobre el cual trabajar, se concentrarán en las bandas de acceso libre, lo cual implicará una mayor saturación de las bandas espectrales, y unas peores prestaciones.

Sin embargo, se da la paradoja de que ese espectro previamente adjudicado está siendo infrautilizado por sus propietarios, lo cual conlleva un desperdicio de recursos espectrales. Esto es debido a que muchas bandas de dicho espectro no se utilizan eficientemente, o incluso no se utilizan en absoluto, como es el caso de ciertas bandas explotadas por operadores de telefonía móvil o de televisión, en las cuales se sufren variaciones en la utilización del espectro asignado, bien temporales o bien geográficas, entre un 15% y un 85% [1], tal y como se aprecia en la Fig.1.

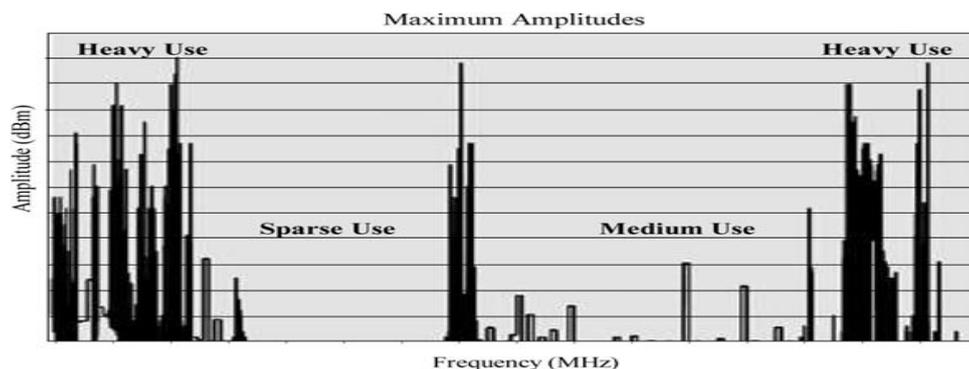


Fig 1. Utilización ineficiente del Espectro en una banda licenciada

Si se pudiese abrir parte de dicho espectro a otros usuarios aparte de sus legítimos propietarios, como usuarios privados o redes de corto alcance, a buen seguro que aparecerían nuevos servicios inalámbricos y se mejorarían algunos de los ya existentes. A modo de ejemplo, basta ver lo ocurrido con el gran desarrollo tecnológico obtenido en la banda ISM de 2.4 GHz, donde conviven varios estándares como Bluetooth o WiFi.

En definitiva, se trata de buscar fórmulas para mejorar la eficiencia espectral de las comunicaciones inalámbricas, y para ello se trabaja en técnicas de acceso dinámico al espectro

electromagnético (Dynamic Spectrum Access: DSA), para mejorar el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas. De entre todas ellas, todo parece indicar que la Radio Cognitiva es la tecnología que hará posible conseguir DSA en bandas licenciadas.

1.2. EVOLUCION

El término Radio Cognitiva (*Cognitive Radio*: CR) fue acuñado por su creador, Joseph Mitola III, en varias de sus publicaciones desde 1999 [2], [3], [4]. Este concepto se plantea como una evolución de la Radio Definida por Software (*Software-Defined Radio*: SDR), de modo que debería ser un sistema inalámbrico reconfigurable que pudiese cambiar cualquiera de sus parámetros de forma automática, dependiendo de las demandas de los usuarios y de la red.

Básicamente, SDR son plataformas que utilizan software para controlar la mayoría de funciones en un dispositivo de comunicaciones, en lugar de hardware, como ocurre en los dispositivos tradicionales. Esto permite múltiples modos de operación y en multitud de bandas, de modo que los diversos parámetros pueden ser reconfigurados sobre la marcha, lo cual ofrece una gran versatilidad y adaptabilidad al entorno de trabajo.

Su funcionamiento se basa en el uso de Etiquetas Radio, formadas por el conjunto de bandas de radio frecuencia, interfaces aire, protocolos y patrones espaciales y temporales que moderan el uso del espectro radio. La Radio Cognitiva (CR) extiende la Radio Definida por Software (SDR) mejorando el uso de dichas etiquetas a través de un metalenguaje llamado lenguaje de representación de conocimiento radio (RKRL).

Este lenguaje representa el conocimiento de las etiquetas radio, dispositivos, módulos software, propagación, redes, necesidades de usuarios y escenarios de aplicación de modo que soporta un razonamiento automatizado sobre las necesidades del usuario. Todo ello posibilita el establecimiento de negociaciones entre peers en base a las etiquetas para lograr la mejor satisfacción para el usuario.

Esto transforma el papel de los nodos radio, que hasta ahora eran simples ejecutores ciegos de protocolos predefinidos, y los convierte en agentes inteligentes, conscientes del contexto radio, cuya misión es la entrega de servicios solicitados por el usuario, todo ello de manera transparente a dicho usuario.

En 2003, la FCC (Federal Communications Commission) fijó la definición de Radio Cognitiva como “una radio que puede cambiar sus *parámetros de transmisión* basándose en el ambiente en el cual opera” [5]. A partir de esta definición, gran parte de los estudios se centraron en esta visión más específica, y sobre esta base se han obtenido varias técnicas adaptativas de acceso a los recursos radio para lograr la agilidad necesaria en cuanto a saltos de frecuencia, cambios de potencia transmitida o variaciones en los esquemas de modulación empleados.

En este nuevo escenario, el término Radio Cognitiva intenta describir dispositivos radio inteligentes que puedan tomar decisiones de forma autónoma usando la información recopilada sobre las condiciones ambientales existentes (como frecuencias, potencias o interferencias), al tiempo que puedan aprender y planificar en base a eventos pasados.

Este nivel de inteligencia requiere que dicho dispositivo radio sea a la vez consciente de sí mismo, así como consciente del contenido y consciente del contexto, de acuerdo con la definición de dada en 2005 por Haykin [6]:

“La Radio Cognitiva es un sistema de comunicación inalámbrico inteligente que es consciente de su entorno (el mundo exterior), y usa la metodología de aprender del entorno y adaptar sus estados internos a las variaciones estadísticas en los estímulos de RadioFrecuencia entrantes a través de los cambios necesarios en ciertos parámetros operativos (como la potencia de transmisión, la frecuencia de trabajo y la estrategia de modulación empleada) en tiempo real, con dos objetivos primarios en mente: lograr una comunicación altamente fiable donde y cuando se necesite, y la utilización eficiente de los recursos del espectro radio.”

Bajo este escenario, la Radio Cognitiva es básicamente una tecnología de capa de enlace para acceso dinámico al radioespectro (DSA) orientada a facilitar la transmisión radio en capa física, como una especie de tecnología de comunicación inalámbrica reconfigurable.

En consecuencia, la capacidad de las redes para transportar paquetes sobre los enlaces de Radio Cognitiva es prioritaria para el correcto funcionamiento del modelo, de modo que los dispositivos de Radio Cognitiva deberán formar redes compatibles con la tecnología de Radio Cognitiva para completar la entrega de paquetes. Este escenario para futuras redes inalámbricas se denomina Redes de Radio Cognitiva (*Cognitive Radio Networks*: CRN) [7].

Adicionalmente, la Radio Cognitiva no sólo proporciona ventajas en cuanto al uso eficiente del espectro, sino que también ofrece muchas posibilidades de diversidad para mejorar las prestaciones del networking.

I.3. CARACTERISTICAS BASICAS

En principio, los dispositivos de Radio Cognitiva podrán tener dos modos de operación:

- *Centralizado*, donde un ente de control se encarga gestionar las tareas para todos los terminales móviles.
- *Distribuido* o autónomo, donde cada terminal móvil se encarga de realizar esas tareas por sí mismo de manera independiente.

Sea cual sea el modo de operación, las tareas mencionadas son básicamente la capacidad de sensor los ambientes de comunicación (ya sean agujeros espectrales, localización geográfica, sistemas o redes disponibles), analizar y aprender la información del entorno con las preferencias y

demandas de los usuarios, y reconfigurarse a sí mismos para adaptarse a los parámetros del sistema, de acuerdo a ciertas políticas y regulaciones en curso.

Dichas características posibilitarán que los dispositivos de Radio Cognitiva (ya sean con infraestructura o ad-hoc) y los Legacy (los usuarios legítimos de una banda en particular) puedan formar parte de una misma Red de Radio Cognitiva. En consecuencia, la tarea crítica en un terminal de Radio Cognitiva es identificar la mejor manera de completar sus funciones de red más allá del nivel de enlace [8], de modo que no se ocasionen interferencias a los terminales con licencia.

En base a esto, se puede decir que un terminal de Radio Cognitiva posee 2 características fundamentales:

- Posibilidad de detectar dinámicamente agujeros espectrales disponibles para comunicarse con otras entidades que también dispongan de capacidades de Radio Cognitiva (*capacidad cognitiva*).
- Posibilidad de reconfigurarse a sí mismo para adaptarse a las características del sistema inalámbrico disponible (*capacidad reconfigurativa*).

Por lo que respecta a la *capacidad cognitiva*, ésta se puede definir como la habilidad de una tecnología radio para capturar o sensar la información procedente de su entorno radio. Esto no se logra simplemente con monitorizar la potencia emitida en las bandas de frecuencia de interés, sino que hacen falta técnicas más sofisticadas para capturar variaciones espacio-temporales en el entorno radio, y así evitar producir interferencias sobre otros usuarios.

A través de estas capacidades, las diversas porciones de espectro que están infrautilizadas por diversos motivos (ya sea geográficamente, temporalmente o de otros modos) pueden ser identificadas de manera dinámica, lo cual propiciará que la mejor banda de espectro pueda ser usada a través de autoseleccionar los parámetros apropiados de operación.

La Radio Cognitiva se puede considerar una tecnología que identifica las oportunidades, usando los agujeros espectrales para realizar las comunicaciones. El acceso a esa banda del espectro se realizará de forma oportunista, esto es, solamente se podrá acceder en el instante en el cual se detecte que dicho agujero espectral no está ocupado por uno de los legítimos usuarios propietarios. Y del mismo modo, dicha banda deberá ser desalojada inmediatamente nada más se detecte la llegada de algún usuario legítimo. En la Fig.2 se ilustra el concepto de agujero espectral.

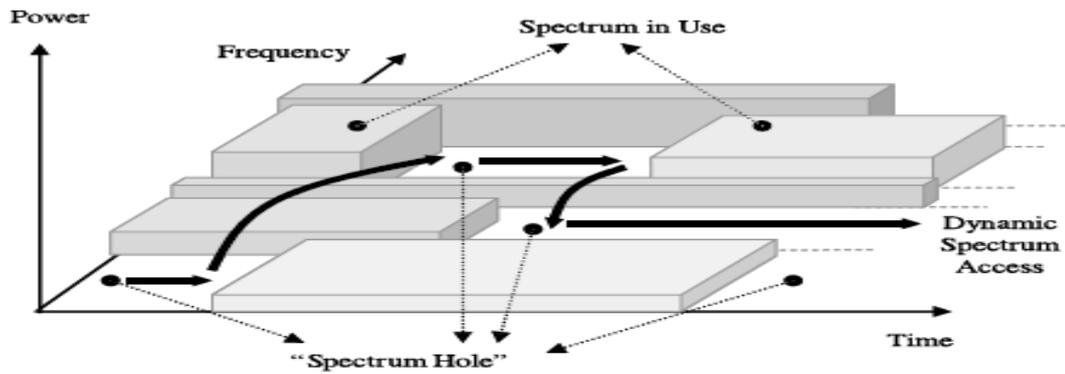


Fig 2: Concepto de Agujero Espectral

Por otra parte, la capacidad cognitiva de una Radio Cognitiva es lo que posibilita la interacción en tiempo real con su entorno para determinar los parámetros de comunicación apropiados y adaptarse al entorno radio dinámico. Las tareas necesarias para las operaciones de adaptación en espectro abierto se conocen como *ciclo cognitivo*, y consta de las siguientes fases:

- Primeramente, en la fase de *Sensado del Espectro*, se monitorizan las bandas de espectro disponibles, se captura la información relevante, y tras procesarla, se detectan los potenciales agujeros espectrales.
- Posteriormente se pasa a la fase de *Análisis del Espectro*, donde se estiman las características de esos agujeros espectrales detectados.
- Finalmente, en la fase de *Decisión del Espectro*, la Radio Cognitiva determina la tasa de transmisión de datos, el modo de transmisión y el ancho de banda a utilizar. Por último, se elige la banda del espectro apropiada en base a las características del espectro y a los requerimientos del usuario.

Adicionalmente, se necesitaría un proceso que coordine el acceso por parte de los usuarios no licenciados a los distintos canales disponibles en cada momento, de modo que se minimicen las interferencias entre los usuarios licenciados y los no licenciados, y además entre los usuarios no licenciados entre sí. Este proceso puede ser llevado a cabo a través de una entidad centralizada o por el contrario se podría operar de forma distribuida en la red.

En cuanto a la *capacidad de reconfiguración*, esto permite al dispositivo radio la capacidad de programarse dinámicamente de acuerdo con el entorno radio en cuestión. Específicamente, los dispositivos de Radio Cognitiva pueden ser programados para transmitir y recibir en varias frecuencias y usando diversas tecnologías de transmisión, siempre y cuando sean soportados por el diseño hardware establecido.

Hay varios parámetros que pueden ser reconfigurados en dispositivos de Radio Cognitiva, como son la frecuencia de operación (la más conveniente), el esquema de modulación empleado (que dependerá si se da prioridad a la tasa de transmisión, donde se usará un esquema más complejo, o si la prioridad recae sobre la tasa de errores, donde será más simple), la potencia transmitida (con una mayor potencia se reduce la tasa de errores, mientras que con menor potencia se reducen las

interferencias y se permite la entrada de nuevos usuarios), además de interoperabilidad entre diferentes sistemas de comunicación.

Adicionalmente, los parámetros de transmisión pueden ser reconfigurados no solo al inicio de la transmisión, sino también durante la misma. Así que dependiendo de las características del espectro en un cierto lugar y momento, los sistemas de Radio Cognitiva pueden variar cualquiera de los parámetros mencionados sin que ello tenga que suponer una interrupción de la comunicación en curso.

1.4. REDES DE AREA REGIONAL

Como aplicación de los fundamentos de Radio Cognitiva, cabe mencionar el estándar IEEE 802.22, que define las redes de área regional inalámbricas (*Wireless Regional Area Network: WRAN*) [9]. El objetivo es la utilización de bandas sin usar (*white spaces*) dentro del rango espectral asignado a las transmisiones de TV en las bandas VHF/UHF entre 54 MHz y 862 MHz.

Este estándar para la transmisión de datos de banda ancha puede alcanzar unas velocidades de hasta 22 Mbps, y su rasgo distintivo es el área de cobertura, que puede llegar a ser de hasta 100 Km, ampliando la oferta de la familia de estándares inalámbricos publicados por el estándar IEEE 802, que se presenta en la Fig.3.

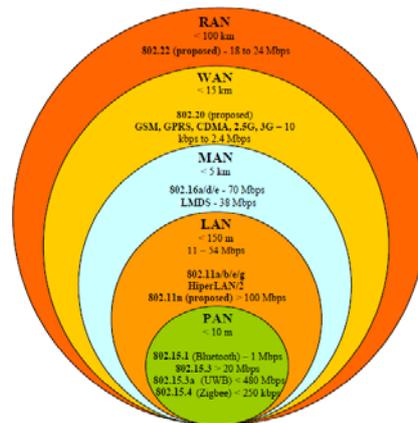


Fig 3: Clasificación de estándares IEEE 802 por área de cobertura

Su implementación permitirá el uso compartido del espectro asignado a los servicios de difusión de TV sin interferir con ellos, lo cual permitirá ofrecer servicios de banda ancha tanto en áreas rurales, como en zonas con baja densidad de población, donde el uso de este rango espectral es escaso, debido a la poca rentabilidad de las transmisiones en dichas zonas. Además, este modelo podría ser empleado en países en desarrollo para facilitar el acceso a internet de la población mediante inversiones mínimas.

El estándar IEEE 802.22 se publicó en 2011, titulado “WRAN: Acceso a los espacios blancos en las bandas de TV basado en Radio Cognitiva”, en el cual se subraya la necesidad de evitar las

interferencias sobre los usuarios titulares de dichas bandas, como pueden ser canales de TV digital y dispositivos de baja potencia con licencia, como micrófonos inalámbricos o videoporteros automáticos.

Los usuarios en estas bandas pueden diferir según los países, ya que cada país posee sus propias regulaciones en esta banda, de modo que pueden variar entre canales de TV digital, telefonía móvil, emisoras de radio o redes de emergencia. Debido a esto, la implementación del estándar IEEE 802.22 debe ser particularizada a las normas vigentes en cada país. Además, muchos países han suprimido ya las emisiones de TV analógica, como España, que lo hizo en el 2010, pero otros todavía no lo han hecho, lo cual también debe ser tenido en cuenta.

Pero el hecho más relevante es que el estándar IEEE 802.22 se puede considerar el primer intento para definir una interfaz aire estándar tomando como base las técnicas de *Radio Cognitiva* para sensar y medir el espectro y detectar la presencia o ausencia de señales licenciadas, para el uso oportunista de bandas de TV infrautilizadas [10].

Este tipo de redes suelen tener un área de cobertura muy amplia (del orden de 100 Km), lo cual hace que se comparta el área de cobertura con otros tipos de redes. Esto hace que los usuarios no licenciados deban coexistir, no solo con los usuarios licenciados en la banda correspondiente, como los canales de TV digital, sino con otros usuarios no licenciados.

De modo que para que no se interfieran entre ellos, al tiempo que todos ellos logren unos niveles de QoS aceptables, las técnicas de Radio Cognitiva son la solución ideal, ya que los usuarios del estándar IEEE 802.22 deberán sensar periódicamente el canal correspondiente para poder acceder a él en caso de estar libre, o abandonarlo de inmediato en caso de llegada de un usuario propietario, para así evitar las interferencias con el dueño legítimo del canal.

Los esquemas de Radio Cognitiva presentes pueden llevar a diseños de red muy complejos, en los cuales los usuarios primarios y secundarios deben coexistir en entornos dinámicos. Esto puede llevar a situaciones de comportamientos inesperados y a una reducción del rendimiento del sistema. Así que de cara al futuro se necesitan nuevos esquemas y herramientas analíticas para llevar a cabo el control y el modelado de las interacciones entre los diversos elementos del sistema, lo cual permitirá hacer realidad la visión de implementar las técnicas de Radio Cognitiva a todas las bandas del espectro, resultando en una mejor eficiencia espectral y en una mejor utilización de los recursos.

II. DESAFÍOS DE LA RADIO COGNITIVA EN EL AÑO 2012

II.1. SENSADO

Como ya se ha comentado anteriormente, la Radio Cognitiva es un paradigma de la comunicación inalámbrica en la cual tanto las redes como los mismos nodos inalámbricos cambian

los parámetros particulares de transmisión para ejecutar su cometido de forma eficiente, y sin interferir con los usuarios autorizados.

Tomando como referencia la definición de Radio Cognitiva emitida por la FCC en 2003: “una radio que puede cambiar sus parámetros de transmisión basándose en el ambiente en el cual opera”, dichos parámetros son fundamentalmente la frecuencia, la potencia, y la modulación empleadas en la transmisión.

Si se compara la Radio Cognitiva con otros estándares inalámbricos actuales, como HSPA, LTE o WiMAX, vemos que todos son capaces de hacer un control de la potencia transmitida y adaptar el tipo de modulación a las condiciones del entorno. Con lo cual, la característica diferencial de la Radio Cognitiva frente al resto de tecnologías es la capacidad de cambiar la banda de transmisión en tiempo real.

Estos cambios en la frecuencia de transmisión estarían orientados a evitar las interferencias ocasionadas a los usuarios legítimos de la banda del espectro en la cual se está trabajando, ya que éstos tienen preferencia en cuanto al acceso a los canales para los cuales están licitados.

De modo que un usuario no licitado sólo podría ocupar un canal donde no haya usuarios licitados. Y además, en el evento de la llegada de algún usuario legítimo al canal que ocupa un usuario no legítimo, este último debería abandonar la banda de inmediato al detectar la presencia de un usuario legítimo.

Para ello, una premisa fundamental es el *sensado* periódico de los canales para verificar si pueden ser ocupados, aunque como ya se ha comentado, este proceso no está lo suficientemente desarrollado actualmente. Se puede afirmar que el escollo principal para la implementación de las técnicas de Radio Cognitiva en los sistemas de comunicación existentes es la falta de fiabilidad del proceso de sensado del espectro [12].

El problema esencial es el diseño de dispositivos detectores de alta calidad y algoritmos para intercambiar los datos de detección del espectro entre nodos. Se ha demostrado que un simple detector de energía no puede garantizar una adecuada detección de presencia de señal, con lo que se necesitan unas técnicas más sofisticadas de detección de espectro y se requiere que la información sobre el estado del espectro se intercambie regularmente entre los nodos.

La solución parece ser que pasa por técnicas de sensado multidimensional, basadas en *sensar*:

- Oportunidad en el dominio de la frecuencia: no se usan todas las bandas a la vez
- Oportunidad en el dominio del tiempo: no se usa una misma banda todo el tiempo
- Oportunidad geográfica (localización: latitud, longitud, altitud; y distancia con los usuarios primarios): las señales del primario no llegan uniformemente a todas partes
- Oportunidad en código: aunque la banda esté ocupada, se puede transmitir usando códigos ortogonales, ya sea en *spread spectrum* o en *frequency hopping* o en *time hopping*

- Oportunidad en ángulo: si los primarios transmiten direccionalmente, se puede aprovechar para otras transmisiones con otros ángulos de haz, teniendo en cuenta la localización del primario

Otra vía de investigación es uso de esquemas de detección multiantenas, explotando la estructura espacial de la señal recibida junto con la información disponible acerca de la forma espectral de las ondas transmitidas, así como las aparentes ventajas de permitir cierta interacción entre los usuarios legítimos y no legítimos del sistema en términos de gestión de interferencias cuando se trata de entornos dinámicos [13].

Asimismo también se está trabajando en algoritmos de detección más complejos como los basados en algoritmos Q-learning, que es una técnica de aprendizaje por refuerzo, mediante la cual un agente actualiza un función de utilidad cada intervalo de tiempo [14], así como desarrollando algoritmos para la predicción del futuro usando información sobre eventos anteriores.

Por aquí pueden venir las técnicas de sensado de espectro que ofrezcan la fiabilidad suficiente para que el paradigma de Radio Cognitiva se utilice a gran escala en cualquier banda de frecuencia. Aunque de momento, no se ha logrado todavía un nivel de confianza lo suficientemente elevado para ello, así que se sigue investigando.

II.2. *SEGURIDAD*

En base al sensado espectral en tiempo real, se espera que las Radios Cognitivas aprendan de las condiciones del entorno, y en base a ello, sean capaces de autoajustarse para lograr un acceso dinámico al espectro. Esto hace que los dispositivos de Radio Cognitiva puedan tomar decisiones flexibles e individuales.

Sin embargo, esto mismo hace que la falta de una coordinación entre los usuarios y un control de red pueda plantear problemas serios en cuanto a la seguridad y a la eficiencia del sistema. Los mayores desafíos en Radio Cognitiva actuales se pueden agrupar en 3 áreas, que son la Seguridad, la Ineficiencia Espectral y el alto coste de los terminales [15].

En cuanto a la fragilidad de la Seguridad, esto es inherente al funcionamiento mismo del paradigma de Radio Cognitiva, ya que el hecho de poder monitorizar el tráfico de un usuario legítimo por parte de un usuario no legítimo en sí mismo ya compromete la seguridad y la privacidad del primer usuario. Esto es, el sensado del espectro del usuario licitado facilita información sobre su patrón de tráfico, el volumen, la ocupación de espectro, e incluso del enrutamiento.

La naturaleza de los sistemas de Radio Cognitiva introduce un nuevo conjunto de amenazas y tácticas que son potencialmente peligrosas y no fácilmente mitigadas. Proporcionar unos estándares de seguridad fuertes es uno de los aspectos más espinosos para que el concepto de Radio Cognitiva sea viable comercialmente a largo plazo.

En cuanto a las amenazas a la seguridad, se tiene la *manipulación del espectro*, ya que la asignación de espectro a los usuarios legítimos debe ser estática y predecible para mejorar las prestaciones de los usuarios no licitados, posibilitando la reutilización de agujeros espectrales. Este hecho propicia que tanto un usuario no licitado como un atacante puedan utilizar las técnicas de Radio Cognitiva para manipular el uso del espectro por parte de un usuario primario y así proceder a ataques de spoofing.

Por otra parte, se pueden dar casos de *Denegación de Servicio*, ya que tanto los usuarios no legítimos como los atacantes pueden distinguir el uso del espectro hecho por cada usuario, pudiendo hacer ataques de jamming para saturar una banda en particular, o en toda la banda en general. Esto se podría mitigar mecanismos de control de acceso y de autenticación.

Del mismo modo, se pueden producir otros ataques, como la emulación de usuario primario (PUE), que consiste en que un atacante puede emitir señales cuyas características emulan las de un usuario legítimo, provocando interferencias severas en el proceso de sensado del espectro y reduciendo los canales disponibles para usuarios licitados [16].

Por lo que respecta a la ineficiencia espectral, esto es debido a las colisiones de tráfico entre usuarios legítimos y no legítimos, o también entre los propios usuarios no legítimos, ya que el tráfico legítimo no puede ser totalmente predicho sin un control de red efectivo, de ahí que se produzca un número de colisiones inevitable, que puede degenerar en fallos en las transmisiones.

Además, existe el problema del alto coste de los terminales, ya que cada terminal necesita realizar sensado del espectro para poder adaptarse al entorno impredecible y además necesita tomar decisiones espectrales en tiempo real. Estas operaciones requieren inversiones costosas en hardware y software, que además llevarán a un gasto excesivo de recursos, que se traducirá en consumos de energía elevados, lo cual incrementarán aún más los gastos.

Una posible solución para minimizar estos problemas de seguridad y eficiencia sería la planteada en [15], en la cual se propone un sistema de control centralizado, similar a los esquemas implementados en telefonía celular. El esquema planteado posee varias estaciones base (fijas y móviles) formando un cluster (LRFM), y es en este nivel donde se implementaría el sensado del espectro y la asignación dinámica de recursos para todos los usuarios pertenecientes al cluster.

Adicionalmente, se define un ente superior que lleva el control de acceso de usuarios (NUMC), de modo que todos los usuarios, ya sean licitados o no, deben registrarse para poder ser autorizados a acceder al sistema. De este modo, todas las tareas de red serán llevadas a cabo por el NUMC, con la asistencia del LRFM, como por ejemplo la autenticación de usuarios, el control de acceso, los handovers espectrales y el accounting. El diseño del modelo se puede ver en la Fig.4.

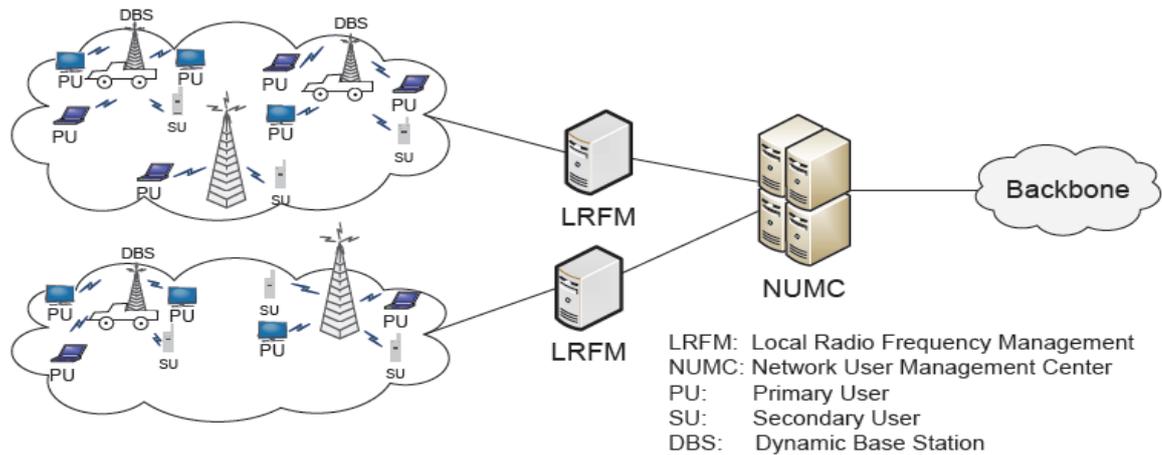


Figura 4: Arquitectura de Red para un mecanismo de control de acceso centralizado

Con esta implementación, se consigue reducir gran parte de los problemas anteriormente expuestos, como el aumento de la seguridad y la privacidad de los usuarios, ya que otros usuarios no podrán monitorizar su tráfico; la eficiencia espectral, ya que las colisiones de tráfico se reducirán considerablemente, y la eficiencia en cuanto a coste, ya que no será necesario realizar sensing espectral de manera continua.

Si además se implementan mecanismos de diversidad multicapa y esquemas de autenticación anónima, será computacionalmente intratable que los adversarios puedan recuperar la información de un usuario final a partir de la comunicación interceptada en la interfaz aire, al tiempo que se previenen ataques DoS sobre usuarios individuales, y ataques de emulación de usuario primario.

La implementación a gran escala de este modelo soluciona varios de los problemas que presenta el paradigma de Radio Cognitiva dentro de las comunicaciones inalámbricas. Tal vez no sea la solución definitiva, pero parece ser un paso en la dirección adecuada.

II.3. ECONOMIA

Otra de las áreas sobre las cuales debe apoyarse el paradigma de Radio Cognitiva es en la Economía, ya que los usuarios no licenciados están accediendo a una porción del espectro electromagnético que no les pertenece, por lo tanto deberían remunerar convenientemente a los legítimos propietarios del espectro en el cual están operando.

Los usuarios licenciados son los legítimos dueños de cierta porción del espectro, bien sea porque lo han adquirido a través de una subasta o de una concesión. Pero a menudo se da la situación de que esos recursos espectrales no son aprovechados completamente por parte de sus propietarios, bien sea porque no se aprovecha todo el ancho de banda, bien porque hay intervalos de tiempo donde el tráfico es escaso, o zonas geográficas donde apenas se opera.

Para maximizar el valor de su inversión, una solución sería la cesión del derecho de usufructo de esa banda de espectro, de modo temporal o permanente, a otros usuarios no licenciados, con la condición de que no interfieran en el uso que hacen de él los usuarios legítimos. De este modo

seguirán operando como si esa banda siguiera siendo exclusivamente suya, pero además recibirán una compensación económica por parte de los usuarios no licenciados.

La tecnología ideal para realizar este acceso oportunista a ciertas bandas del espectro durante unos intervalos de tiempo apropiados es la Radio Cognitiva. Si un usuario no licenciado quiere transmitir en cierto canal, realizará un sensado de ese canal y si no detecta a otro usuario licenciado, entonces podrá disfrutar de los recursos que ofrece ese canal, pero solo hasta que detecte la llegada de un nuevo usuario licenciado, momento en el cual deberá abandonar dicho canal inmediatamente.

Así que el dueño legítimo de esa banda de espectro y los usuarios no licenciados que estén interesados en aprovechar los canales disponibles de manera oportunista deberán entablar una negociación para intentar llegar a un acuerdo económico que sea beneficioso para ambas partes, o alternativamente, se podrá realizar una subasta para ver cuánto están dispuestos a pagar los usuarios no licenciados por el acceso al espectro.

Es decir, que los usuarios no licenciados deberán satisfacer una cantidad que dependerá en cada caso de las características del espectro ofrecido, como por ejemplo del porcentaje de espectro disponible o de la tasa de acceso al espectro, y también dependerá de las expectativas económicas que espere obtener de la utilización de dicho espectro [17].

La disponibilidad y la calidad de las oportunidades espectrales pueden variar de manera rápida a lo largo del tiempo debido a la actividad de los usuarios licenciados como por la competencia entre los usuarios no licenciados por acceder al canal. Es por esto que los esquemas de asignación y compartición dinámicos de espectro son necesarios para lograr un acceso al espectro flexible en escenarios a largo plazo, debiendo además ser capaces de adaptarse a todo tipo de eventos, como variaciones del canal, basándose en observaciones locales.

Mediante la utilización de mecanismos inspirados en Teoría de Juegos para asignar espectro de forma dinámica, se ofrecen las soluciones más justas y eficientes para todos los agentes implicados en la redistribución dinámica de acceso al espectro, ya que así se refleja de manera realista un entorno de radio frecuencia que es variante con el tiempo [18].

Es la Teoría de Juegos la que nos muestra que la cooperación entre usuarios licenciados y no licenciados maximiza el aprovechamiento del espectro para todas las partes, y que por el contrario, cuando alguna de las partes solo intenta maximizar sus beneficios, entonces nunca se llega a una solución óptima para todos.

II.4. ENRUTAMIENTO EN REDES AD-HOC

El estudio de las redes inalámbricas sin infraestructura, como las redes Ad-Hoc, las redes inalámbricas de sensores o las redes vehiculares acarrea una serie de complicaciones adicionales debido a la constante movilidad de los nodos.

Centrando el discurso en las redes Ad-Hoc, cada nodo tiene un radio de transmisión y es capaz de enviar un mensaje a todos los vecinos que estén dentro de ese radio. Por otra parte, en un entorno broadcast (como las redes inalámbricas) cada nodo envía el mismo mensaje a todos dentro de su radio de transmisión.

Este hecho puede producir un exceso de paquetes en la red cada vez que se quiera realizar una transmisión, ya que cada nodo que reciba un paquete lo retransmitirá a todos sus vecinos, sin importar la posición de éstos. Para reducir el overhead y la redundancia derivadas de dichas transmisiones broadcast excesivas, se introduce el concepto de *Connected Dominating Set* (CDS).

La implementación de un CDS en una red Ad-Hoc sólo requiere el mantenimiento de las posiciones de los vecinos, y la ventaja de su uso está en que la retransmisión broadcast solamente por parte de los nodos del CDS asegura que la transmisión llegue a todos los nodos que conforman la red Ad-Hoc [19]. De este modo se logra un algoritmo de enrutamiento adecuado a los ambientes Ad-Hoc, en los cuales ni los algoritmos de enrutamiento basados en vector distancia ni los basados en estado del enlace logran aportar resultados satisfactorios.

La relación del CDS con el paradigma de Radio Cognitiva es inmediata, ya que se espera que en un futuro no muy lejano, esta tecnología se pueda implementar a cualquier tipo de comunicación inalámbrica, y eso incluye las redes sin infraestructura, que son las que usan el concepto de CDS para enrutar sus paquetes.

Las redes Ad-Hoc se caracterizan porque van cambiando su topología con el paso del tiempo debido al movimiento de los nodos. Estos cambios se acentúan en los entornos de Radio Cognitiva, ya que además de ese movimiento, hay que sumar el comportamiento imprevisible de los usuarios licenciados, ya que a su llegada los usuarios no licenciados deben abandonar el canal correspondiente.

Este hecho invalida el CDS cada vez que los usuarios legítimos reclaman el acceso al espectro licenciado, haciendo que el CDS no funcione como se espera en ambientes de Radio Cognitiva. Esto obliga a buscar nuevos criterios con el fin de maximizar la duración esperada del CDS, al tiempo que se minimiza su tamaño.

Este tipo de problema es NP-hard, y en [20] se ha resuelto mediante un algoritmo de 3 fases, basándose en un mecanismo de poda para maximizar el tiempo de vida del CDS. Los resultados obtenidos confirman que, dada una CRN, el algoritmo computa un CDS que maximiza la duración del CDS, al tiempo que fija una cota superior para su tamaño.

Este campo de actuación todavía está en sus albores, y tanto es así que es la única referencia bibliográfica sobre el estudio de CDS en CRN que aparece en la literatura en la actualidad. Es de esperar que conforme se aparezcan más estudios sobre este tema, se irán desarrollando algoritmos más efectivos.

III. ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES DE RADIO COGNITIVA DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL TRAFICO

III.1. ACCESO DINAMICO AL ESPECTRO

Si nos centramos en la vertiente telemática de las Redes de Radio Cognitiva, podemos estudiar cómo se comportan estas redes frente a diversos tipos de tráfico. Ante todo, hay que recordar que estas redes permiten la implementación de técnicas de *acceso dinámico al espectro* (DSA).

Con ello se optimiza el uso de bandas infrautilizadas, permitiendo que usuarios no licenciados (usuarios *DSA*) puedan acceder a canales licenciados de manera oportunista, de modo que la interferencia detectada por los usuarios legítimos (usuarios *legacy*) se mantenga bajo unos valores mínimos aceptables.

En cuanto a los usuarios *DSA*, o no licenciados, van a ser considerados como **usuarios secundarios** (*SU*), ya que van a acceder a unos canales para los cuales en principio no están autorizados. Mientras que a los usuarios *legacy*, o licenciados, van a ser considerados como *usuarios primarios* (*PU*), ya que son los legítimos propietarios de los canales que usan.

En la mayoría de los casos, los PU estarán trabajando con tecnologías más antiguas (*legacy*), con lo cual no van a tener capacidades para variar la banda de trabajo ni otros parámetros de transmisión (no serán usuarios de Radio Cognitiva). Esto implica que, idealmente, no deberían enterarse de la presencia de SU, y su modo de operación no debería variar del originalmente dispuesto para ellos.

Esto hace que en la mayoría de escenarios reales, los SU deban llevar todo el peso del sentido del canal (examinando todas las dimensiones consideradas en cada caso) y deban hacer las reconfiguraciones pertinentes para adaptarse a las condiciones del canal, de modo que los PU reciban las mínimas interferencias posibles debido a la existencia de SU.

Para que se cumpla el requisito de mínima interferencia para los PU, un SU deberá abandonar el canal nada más detecte la presencia de un PU en el canal sobre el que esté trabajando, ya que el PU en cuestión percibirá ese SU como una interferencia en el canal.

Llegado este caso, el SU deberá aprovechar sus capacidades DSA para cambiar su banda de trabajo hacia otro canal sobre el cual pueda trabajar sin causar interferencias indeseables a otros usuarios. Esta circunstancia es lo que se conoce como HandOver Espectral (SH). Pero si llegado el momento del abandono del canal, no se encontraran otras bandas disponibles, el usuario (o usuarios) que ocupen ese canal serán forzados a terminar sus transmisiones.

Existen gran variedad de estudios en la literatura centrados en mecanismos prioritarios para tratar los HandOvers convencionales en redes celulares [21]. Sin embargo, el HandOver Espectral y el HandOver convencional son diferentes en su naturaleza, con lo cual deben ser modelados de forma diversa.

Respecto a la gestión de las interferencias, en la mayoría de propuestas de la literatura se toma un enfoque reactivo, en el cual un SU solamente se realiza un HandOver Espectral después de detectar interferencias con un PU, o sea, la llegada de un nuevo PU sobre el canal que está ocupando actualmente.

Sin embargo, puede resultar más interesante un enfoque proactivo, para minimizar los efectos sobre los PU [22], mejorando así sus prestaciones significativamente, ya que se reducen las interferencias hasta en un 30%, mientras que en los SU se reduce considerablemente el jitter en el throughput.

Para llevar a cabo este enfoque proactivo, se deben cumplir dos premisas:

- La realización de un sensado del espectro, lo cual requiere detener cualquier transmisión en curso [23].
- Además esta operación se debe realizar con la frecuencia adecuada para detectar rápidamente las llegadas de nuevos PU [24].

Si se quieren gestionar ambas condiciones, los intervalos de transmisión y sensado del espectro deben repetirse cíclicamente [25], lo cual impone una penalización en el rendimiento del sistema, aunque se lograrán reducir las interferencias.

Otra vía para evitar interferencias sería la cooperación entre la red de usuarios primarios y la red de usuarios secundarios para reducir el nivel de interferencias generado, a través de la compartición de los patrones de búsqueda de nuevos canales para configurar una nueva sesión PU. Los SU pueden usar esta información para evitar ocupar los canales más probables para un nuevo PU, con lo cual tanto los PU como los SU se beneficiarán de esta estrategia [26].

El objetivo primordial de los modelos propuestos en la literatura es llegar a optimizar tanto el throughput del sistema como la reducción del nivel de interferencias detectadas, ya sea en los PU como en los SU.

III.2. MODELO DE TRAFICO STREAMING EN PU Y EN SU CON CONTROL DE ADMISION ADAPTATIVO

El tráfico streaming es generado por aplicaciones que requieren una cantidad mínima de ancho de banda para su transmisión y se caracteriza porque su tiempo de transmisión no se ve afectado por el número de canales asignados. Algunos ejemplos de tráfico streaming son las comunicaciones VoIP, el vídeo o cualquier otro tráfico de tiempo real.

Existen multitud de estudios referentes a la gestión de interferencias en ambientes de tráfico streaming, de los cuales el modelo planteado en [27] es de los más completos, y de donde se han obtenido ideas para la realización del presente estudio. Este se centra en el estudio de la calidad de servicio (QoS) percibida tanto por los PU como por los SU, donde ambos cursan tráfico streaming. El estudio se va a realizar desde la perspectiva del tráfico, habida cuenta que las técnicas de gestión

de tráfico complementan las definidas a nivel físico. La base de este modelo será una cadena de Markov en tiempo continuo, que simboliza el acceso y salida del canal por parte de ambos tipos de usuarios, tanto PU como SU [28].

Por una parte, la QoS en los PU se va a medir a través de la probabilidad de interferencia, siendo ésta la probabilidad de que a la llegada de una sesión PU se produzca el desplazamiento de una o varias sesiones SU por estar ocupando el canal que va a ser ocupado por la PU.

Por el contrario, la QoS en los SU se va a medir a través de la probabilidad de terminación forzosa, siendo ésta la probabilidad de que cuando se produzca el desplazamiento de una o varias sesiones SU, no haya disponible ningún canal libre para realizar el HandOver Espectral.

Partiendo de ahí, se han desarrollado varias mejoras para lograr *reducir la probabilidad de interferencias* [27] y por ende mejorar el nivel de QoS en los PU:

- Un mecanismo de Acceso al Canal llamado mecanismo de asignación con preferencia (CAP), en el cual el sistema numera todos los canales de izquierda a derecha, y asigna el primer canal libre por la izquierda a una nueva sesión PU (empezando por el canal 1, o sea, el primero), mientras que asigna el primer canal libre por la derecha a una nueva sesión SU (empezando por el canal M, o sea, el último).
- Adicionalmente, a la salida de alguna de las sesiones, el sistema puede recolocar una sesión PU hacia un canal más hacia la izquierda (canal con una numeración inferior) o alternativamente se puede recolocar una sesión SU hacia un canal más hacia la derecha (canal con una numeración superior). Este mecanismo se llama CAP con repacking.

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas muestran que el mecanismo de Control de Acceso CAP reduce las interferencias causadas por SU sobre los PU en al menos un orden de magnitud sobre el acceso aleatorio al canal. Además, si se utiliza el mecanismo CAP con repacking se logran resultados aún mejores, pero parece ser que no compensa el empleo de recursos adicionales para obtener ese margen de mejora, así que el método ideal es CAP.

Por otra parte, se ha buscado una manera de *limitar la probabilidad de terminación forzosa* [27] de modo que se pueda mejorar el nivel de QoS en los SU. Para ello se implementa un esquema de reserva de canales llamado Canal de Guarda Fraccional, con el objetivo de dar prioridad a los HandOver Espectrales frente a nuevas llegadas de SU.

En definitiva, con este método se están reservando unos canales de guarda dedicados exclusivamente a las operaciones de HandOver Espectral futuras, de forma similar a como se hace en redes celulares [29]. Se da la circunstancia de que los resultados numéricos permiten afirmar que el throughput de los SU no se puede maximizar mediante la configuración del parámetro de reserva, contrariamente a lo admitido en la literatura.

Finalmente, se ha propuesto un esquema de Control de Admisión Adaptativo que es capaz de limitar tanto la probabilidad de interferencia como la probabilidad de terminación forzosa, de modo

que se consigue mejorar la tanto la QoS de los PU, como de la QoS de los SU, de manera simultánea.

Este esquema generaliza una nueva estrategia de Control de Admisión adaptativo desarrollado en [30], que opera junto con una conocida política de reserva de troncales llamada Canal de Guarda Múltiple (MGC). La novedad es que permite controlar varios objetivos a la vez para el mismo flujo de llegada, en vez de uno solo por flujo, como se había propuesto anteriormente.

Con esta política de admisión, cuando las condiciones del tráfico no sean estacionarias, el esquema adaptativo irá continuamente ajustando los umbrales para intentar cumplir con los objetivos prefijados, siempre que sea posible. En definitiva, con este modelo de Control de Admisión Adaptativo se logra garantizar un cierto grado de QoS tanto para PU como para SU, y los resultados obtenidos prueban su validez sea cual sea el tipo de proceso de llegada de tráfico o el tipo de distribución de servicio.

III.3. *MODELO DE TRAFICO STREAMING EN PU Y TRAFICO ELASTICO EN SU CON CONTROL DE ADMISION FIJO*

El tráfico elástico se caracteriza porque no es en tiempo real, con lo cual, no necesita unas tasas de transmisión mínimas. Esto hace que pueda adaptar sus tasas de transmisión de acuerdo a los recursos disponibles, sin que ello suponga un empeoramiento del servicio ofrecido. Ello implica que su tiempo de transmisión dependerá del tamaño del flujo y de la carga del sistema, la cual es impredecible. Algunos ejemplos de tráfico elástico son la transferencia de archivos, la navegación web o cualquier otra conexión TCP establecida.

Tal y como se ha propuesto en el modelo anterior, el modelo planteado [31] se va a centrar en el estudio de la calidad de servicio (QoS) percibida por los PU y por los SU. La base de este modelo será una cadena de Markov en tiempo continuo, que simboliza el acceso y salida del canal por parte de los PU y de los SU [27]. El estudio se va a realizar desde la perspectiva del tráfico, ya que las técnicas de gestión de tráfico complementan las definidas a nivel físico.

Pero a diferencia del modelo anterior, en este modelo hay que tener en cuenta los distintos tipos del tráfico cursado:

- El tráfico cursado por los PU es streaming, lo cual implica que se necesita una cantidad mínima de ancho de banda para su transmisión
- En cambio, el tráfico cursado por los SU es *elástico*, lo cual no implica ninguna restricción en cuanto a la tasa mínima de transmisión, mientras no se diga lo contrario

Esta diferencia de tráfico respecto al modelo anterior se tiene que ver reflejada en su tratamiento. En el caso de tráfico SU streaming, se hablaba de Terminación Forzosa cuando un SU no disponía del ancho de banda mínimo para realizar un HandOver Espectral, con lo cual debía ser expulsado del sistema, o también se hablaba de Bloqueo, cuando un nuevo SU no tenía canal

alguno para entrar en el sistema. Ello inducía las expresiones de probabilidad de terminación forzosa y probabilidad de bloqueo, donde la primera marcaba la QoS percibida.

Sin embargo, en el caso de tráfico SU elástico, no se imponen requisitos mínimos de ancho de banda, al menos en principio, con lo cual no pueden ocurrir terminaciones forzosas, ni bloqueos, ya que los SU siempre pueden adaptar su tasa de transmisión cuando un nuevo flujo SU es aceptado, de modo que el ancho de banda disponible para los SU se compartirá entre todos los flujos SU que se encuentren en un momento dado en el sistema. Y de igual manera, el ancho de banda disponible también se compartirá cuando se acepte una nueva sesión PU, o cuando se finalice el servicio de cualquier usuario.

Esto hace que se deban buscar nuevos indicadores para evaluar el rendimiento de este modelo, pero en la literatura hay pocos estudios sobre escenarios similares. Un ejemplo es el planteado en [32], donde se evalúa un escenario donde un número finito de SU ofrecen tráfico elástico, aunque no se tiene en cuenta ni las interferencias ni la impaciencia de los SU, con lo cual el estudio resulta ser muy restringido.

Centrándonos en el modelo que se plantea aquí [31], si se pretende que sea un modelo realista, debe tratar las siguientes temas: *impaciencia, interferencias, control de admisión y limitaciones en el acceso* a los SU.

En primer lugar, cuando la demanda de tráfico elástico total supera la capacidad de los canales disponibles, se produce una situación denominada congestión (overload) en la cual algunos flujos SU podrían cancelarse debido a la *impaciencia*. La impaciencia de los flujos SU debida a un throughput muy bajo puede aparecer por dos motivos: ya sea por la impaciencia humana o porque algún protocolo de capa superior interprete que la conexión se ha caído.

Este fenómeno tiene un impacto negativo en la eficiencia de las comunicaciones porque los flujos no completados están malgastando capacidad del sistema. Esta caída en la eficiencia ha llevado a la sugerencia de que se debe aplicar un Control de Admisión al tráfico elástico [33].

En cuanto al estudio de las interferencias causadas por los SU sobre los PU, se utiliza la probabilidad de interferencia, que se puede definir como la fracción de llegadas PU que obligan a desplazarse a algún SU [27]. Para su reducción, se propone un mecanismo de Acceso al Canal llamado mecanismo de asignación con preferencia (CAP), ya descrito en el apartado anterior.

Adicionalmente, para controlar aún más la interferencia se puede limitar el número de canales a los cuales los SU tienen acceso, manteniendo este valor fijo. Este es un método efectivo para controlar las interferencias, con lo cual se mejorará la QoS percibida por los PU, pero como contrapartida, hará que el número de abandonos aumente. Eventualmente, para limitar el número de abandonos, y así mejorar la QoS percibida por los SU, se incorpora un esquema de control de admisión para los SU, mediante el establecimiento de un valor máximo fijo.

Teniendo todo esto en cuenta, estas son las características básicas del sistema diseñado [31]:

- Se asume que cada sesión PU ocupa justo un canal.

- Se asume que cada flujo SU ocupa como máximo un canal, aunque también se asume que los flujos secundarios comparten todo el ancho de banda de que disponen de manera alícuota, como un flujo continuo, con cambios de tasa cuando ocurre un evento de llegada o salida, tanto de PU como de SU, o sea, se está asumiendo una capa MAC ideal para los SU.
- Se asume que los HandOver Espectrales se realizan de forma instantánea en tiempo 0.
- La red de Radio Cognitiva dispone de una entidad de control, que puede ser centralizada o distribuida, que se encarga de asignar los canales a cada sesión o flujo, ya sea a través del sensado del canal o mediante coordinación con la entidad de control de la red primaria.
- El sistema dispone de C canales, donde los SU pueden acceder a cualquiera de ellos, mientras no esté ocupado por un PU. En cambio, los PU no pueden acceder a una serie de canales (por lo menos 1) que estarán reservados para que los SU no sufran de inanición. Esto puede ser establecido mediante acuerdos comerciales entre PU y SU.
- Se consideran 3 modos de acceso: aleatorio, CAP, CAP con repacking, definidos en el apartado anterior.

Por último, falta tratar los *esquemas de control* implementados. Por una parte, para controlar la probabilidad de interferencia (P^{if}), el *número total de canales físicos disponibles para el tráfico elástico* se limita a un valor fijo R , que hará las veces de umbral, siendo $R \leq C$.

Esto implica que los flujos SU ocuparán un máximo de R canales y un mínimo igual al número de canales reservados para SU (cuyo valor mínimo es 1), de modo que el número de canales SU en cada instante dependerá de las condiciones del tráfico PU.

Esto se entiende teniendo en cuenta que una sesión PU entrante tiene preferencia en el acceso y por eso puede desplazar flujos SU, en cuyo caso reducirá en una unidad el número de canales disponibles para SU, mientras que dichos canales aumentarán en una unidad cuando una sesión PU salga del sistema, aunque las variaciones respetarán siempre los límites establecidos.

Por otra parte, para controlar la probabilidad de abandono (P^{ab}), se aplica un Control de Admisión, de modo que si el *número total de flujos SU activos* es igual a un valor fijo F , que hará las veces de umbral, entonces se rechazará la llegada de nuevos flujos SU. Y si es inferior a F , entonces un nuevo flujo SU será aceptado.

La introducción de un límite superior para el número de flujos SU (o sea, F) pone coto a la probabilidad de abandono, ya que al evitar la entrada de más SU, se está impidiendo que el factor de congestión disminuya en exceso, lo cual haría que la impaciencia se disparara con excesiva rapidez, lo que eventualmente repercutiría en un aumento de la P^{ab} .

Así mismo, la introducción de un límite superior para el número de canales disponibles SU (o sea, R) pone una cota superior a la probabilidad de interferencias, ya que al impedir que los flujos SU ocupen más canales, se hace más difícil que a las nuevas sesiones PU se les asigne un canal que esté siendo ocupado por flujos SU, lo cual repercute en una disminución de la P^{if} .

Teniendo esto en cuenta, se podría asociar el umbral R con la QoS percibida por las sesiones PU, ya que favorece la disminución de la P^{if} , mientras que análogamente se podría asociar el umbral F con la QoS percibida por los flujos SU, ya que favorece la disminución de la P^{ab} .

Los resultados obtenidos en las simulaciones del modelo [31], señalan que tanto la gestión de interferencias como los mecanismos de control de acceso se pueden sintonizar de forma independiente. Este hecho simplifica el ajuste de los esquemas para diversas condiciones de tráfico.

Además, los resultados confirman que cuando los esquemas propuestos están activos, la sensibilidad del rendimiento de los parámetros del sistema a la distribución del tamaño de flujo y al tiempo de llegada de flujos es menor. En cambio, la sensibilidad del tiempo de impaciencia sigue siendo alta incluso con los esquemas diseñados en acción.

En definitiva, este mecanismo de Control de Acceso, junto con la implementación del mecanismo de impaciencia y el mecanismo de acceso CAP para controlar las interferencias, ofrecen un escenario más realista para tratar los escenarios de tráfico elástico en Redes Cognitivas.

IV. ESTUDIO DE UN SIMULADOR DE RADIO COGNITIVA CON CONTROL DE ADMISION ADAPTATIVO

El trabajo que se plantea es una evolución del último modelo expuesto en el apartado anterior. Para ello se propone un *Control de Admisión Adaptativo*, con lo que se espera que mejoren las prestaciones del sistema, tanto para el tráfico primario como para el secundario.

IV.1. LENGUAJE DE SIMULACIÓN UTILIZADO: SMPL

Los lenguajes de simulación se clasifican según sean orientados a actividad, orientados a eventos u orientados a procesos, basándose en la organización de los procedimientos escritos en dicho lenguaje, de modo que un procedimiento describirá una actividad, un evento o un proceso, según el tipo de lenguaje utilizado [34].

Los lenguajes orientados a procesos se suelen emplear en modelos de simulación a gran escala, de modo que constituyen una descripción directa de las operaciones del sistema. Esta verosimilitud entre modelo y sistema permite asegurar que el modelo es una representación válida del sistema, aunque su complejidad hace que solo se use en grandes simulaciones.

En cambio, los lenguajes orientados a eventos se adaptan mejor a modelos de pequeña o mediana escala. Se caracterizan por imponer una visión global y mononivel del sistema, propiciando que actividades inconexas compartan la única rutina de eventos. Esto hace que el sistema se vuelva difícil de identificar y de cambiar, aunque simplifica su implementación.

La clave del éxito en este tipo de simulaciones está en estructurar cuidadosamente el modelo, tomando una visión orientada a procesos del sistema y organizando el modelo en concordancia.

Esto propiciará mayor claridad en el modelo y su mayor sencillez de ejecución respecto al anterior le conferirá ventajas a la hora de implementarlo.

Tras analizar todas las opciones, los modelos se han implementado en un lenguaje de simulación de eventos discretos, llamado SMPL, empleado para simular sistemas de comunicaciones y procesos informáticos, a través de unas bibliotecas desarrolladas en lenguaje C [35]. Con ello se pretende lograr un sistema relativamente sencillo, y que a su vez simule los algoritmos de Radio Cognitiva propuestos en este estudio de la manera más fiel posible.

Además, esta librería también contiene un generador de números aleatorios, que mediante la elección de las semillas apropiadas, permite obtener secuencias de 100.000 números sin solapamiento: $x_n = 7^5 \cdot x_{n-1} \bmod(2^{31} - 1) = 16807 \cdot x_{n-1} \bmod(2147483647)$ (1)

Tomando como base este generador, se aplica el método de la Transformada Inversa, que consiste en generar un número aleatorio uniformemente distribuido en el intervalo [0,1] (lo cual nos lo proporciona el generador de números aleatorios) y posteriormente aplicarle la función de distribución inversa respecto de la función de distribución deseada [36]. La librería SMPL contiene generadores para varios tipos de distribuciones como uniforme, normal exponencial, erlangiana o hiperexponencial.

IV.2. PRESENTACION DEL ESCENARIO A SIMULAR

El objetivo marcado en este trabajo es ampliar el modelo de Radio Cognitiva con tráfico streaming para la red primaria y tráfico elástico para la red secundaria, presentado en el apartado 3.3, pero haciendo que los Controles de Admisión sean adaptativos, esto es, que puedan variar según las características del tráfico recibido, y estudiar su comportamiento en estas condiciones.

Para ello, se desarrollará un algoritmo que simule el modelo anterior, pero añadiéndole las características necesarias para que los Controles de Acceso puedan funcionar de diversos modos:

- modo estático, en el cual los límites del número de canales SU y número de flujos SU serán constantes a lo largo de la simulación, o sea, lo que sucede en el modelo anterior;
- modo *adaptativo*, en el cual dichos límites irán fluctuando a lo largo de la simulación, según los objetivos de probabilidad de interferencia y abandono preestablecidos inicialmente;
- y el modo *básico*, en el cual no se implementa límite alguno, lo cual correspondería a un caso sin control de acceso, que nos servirá como línea base para realizar comparaciones.

Es importante tener en cuenta que todas las posibles variaciones van a ser ejecutadas sobre el mismo código, de manera que el modo de funcionamiento y sus características se fijarán en tiempo de ejecución. En otras palabras, el flujo de ejecución del algoritmo será siempre el mismo, pero éste realizará acciones distintas, dependiendo de los parámetros establecidos al ejecutar la simulación.

Para la implementación realizada, se ha asignado el parámetro R como el límite máximo de canales a los cuales pueden acceder los usuarios secundarios, mientras que el parámetro F designa el número máximo de flujos secundarios que tienen acceso concurrentemente al sistema. Ambos parámetros variarán a lo largo del tiempo de ejecución, en función de las condiciones del tráfico.

En cuanto a los resultados, la forma de validar los resultados obtenidos con los umbrales adaptativos a lo largo del tiempo de simulación será el cálculo de las medias, tanto del número máximo de canales SU, como del número máximo de flujos SU. Para ello, se procederá a la medición de las áreas encerradas bajo ambos valores a lo largo de todo el tiempo de simulación. Adicionalmente se deberían medir también las varianzas correspondientes, para valorar la calidad de las mediciones.

Hay que notar que los resultados obtenidos con el algoritmo adaptativo serán más precisos, en el sentido de que tienen mayor nivel de detalle, así que serán más afinados que los obtenidos con el algoritmo estático, que tienen menor nivel de detalle. Esto también se verá reflejado en que los valores medios de los umbrales de control de acceso (R y F) obtenidos para el caso adaptativo son racionales, mientras que en el caso estático son valores enteros (precisamente los fijados en tiempo de ejecución).

Para poder validar los resultados adaptativos, que son los novedosos, con los estáticos, se procederá a realizar una serie de modificaciones que permitan equiparar los resultados obtenidos en ambos casos, o sea, que ofrezcan un nivel de detalle mayor para los resultados obtenidos con el algoritmo donde los umbrales son estáticos.

Dichas modificaciones consistirán en la oscilación de ambos valores, tanto del número de canales máximo para SU (o sea, R), como del número máximo de flujos SU (o sea, F), entre su valor estático y el entero superior. Las variaciones se llevarán a cabo según cierta probabilidad, que llamaremos probabilidad fraccional y que será fijada en tiempo de ejecución entre su valor estático fijado y el entero superior.

Así que a cada una de las variables para el Control de Admisión le corresponderá una probabilidad fraccional distinta, ya que como se dijo anteriormente, ambos valores pueden ser ajustados de forma independiente. Esto dará lugar a cuatro casos a varias combinaciones a lo largo de la simulación:

- el valor de R sube una unidad, mientras que el valor de F sigue en su valor inicial
- el valor de R sigue en el valor inicial, mientras que el valor de F sube un unidad
- ambos valores se incrementan en una unidad
- ambos valores mantienen sus valores iniciales

Es decir, si se tiene en cuenta que las variables R y F reciben un valor entero en tiempo de ejecución, a lo largo del tiempo de simulación cada una de ellas sufrirá un incremento probabilístico, según su probabilidad fraccional asociada, de valor 1 unidad.

Con ello se logrará que, al calcular la media de las variables R y F a lo largo de todo el tiempo de simulación, dichos valores tengan un valor fraccionario, que oscilará entre el valor prefijado en tiempo de ejecución y su entero superior.

Eventualmente se usarán las medias obtenidas, tanto para el número máximo de flujos SU (F) como para el número máximo de canales SU (R), para simular un modelo estático con valores fraccionales de los umbrales. Así, si se obtienen mejores resultados con el caso adaptativo, significará que dicho algoritmo mejora su contraparte estática.

Adicionalmente se ha decidido implementar un segundo método de validación, consistente en buscar mediante el mecanismo de “prueba y error” los valores de R y F que permitan obtener los objetivos prefijados a través del caso estático con valores fraccionarios de los umbrales. Llegados a este punto, se podrá comparar el rendimiento de ambos sistemas, de modo que se verá si el

Finalmente, se han implementado 2 tipos de algoritmos adaptativos, cada uno de ellos con los 3 modelos de control de acceso descritos anteriormente:

- *General*, siguiendo el funcionamiento del modelo planteado en el apartado 3.3.
- *con Canal de Guarda*, dejando siempre un canal de guarda para facilitar la llegada de PU

IV.3. IMPLEMENTACION DEL MODELO ADAPTATIVO GENERAL

Lo más importante a la hora de desarrollar un algoritmo adaptativo es fijar las condiciones en bajo las cuales se va a producir el cambio de valor de cierta variable, y cuál debe ser el valor de dicho ajuste.

Los parámetros que sirvan de referencia para el control de acceso adaptativo del modelo serán los siguientes:

- La *probabilidad de interferencia* (P^{if}), que se puede considerar como la QoS percibida por las sesiones PU, ya que ésta será mayor cuanto menor sea P^{if}
- La *probabilidad de abandono* (P^{ab}), que se puede considerar como la QoS percibida por los flujos SU, ya que ésta será mayor cuanto menor sea P^{ab}

Esto lleva a que los 2 *objetivos de probabilidad* que se deben fijar en este modelo son:

- El *objetivo de probabilidad de interferencia* (B^{if}), al cual deberán tender la P^{if}

$$\mathbf{B}^{if} = n^{if} / d^{if}, \text{ con } n^{if}, d^{if} \in \mathbf{N}, \quad (2)$$

donde:

- n^{if} es el número de sesiones PU que recibe interferencias a su llegada al sistema, debido a la presencia de algún flujo SU ocupando el canal que le corresponde
 - d^{if} es el número de sesiones PU contabilizadas.
- El *objetivo de probabilidad de abandono* (B^{ab}), al cual deberá tender la P^{ab}

$$\mathbf{B}^{ab} = n^{ab} / d^{ab}, \text{ con } n^{ab}, d^{ab} \in \mathbf{N}, \quad (3)$$

- n^{ab} es el número de flujos SU que abandonan sin concluir sus transmisiones debido a la activación del evento de impaciencia
- d^{ab} es el número de sesiones SU contabilizadas,

Se pasarán como parámetros de entrada el numerador y el denominador de cada uno por separado, de modo que se puedan afinar mejor las probabilidades (1/100, 2/200, 3/300,... cuyo significado es 1 caso de interferencia/abandono de cada 100 casos totales).

El funcionamiento del esquema adaptativo planteado respecto a los umbrales de control de acceso, R y F, se especifica en la Tabla 1:

EVENTO	CONDICION	ACCIÓN
Llegada PU	Si echa SU	{R \leftarrow R - 1} con probabilidad $1 / n^{if}$
	Si NO echa SU	{R \leftarrow R + 1} con probabilidad $1 / (d^{if} - n^{if})$
Abandono SU	Si abandona	{F \leftarrow F - 1} con probabilidad $1 / n^{ab}$
Servicio SU	Si sale con éxito	{F \leftarrow F + 1} con probabilidad $1 / (d^{ab} - n^{ab})$

Tabla 1: Esquema adaptativo para los umbrales de control de acceso

Hay que tener en cuenta que en condiciones de tráfico estacionario, donde $P^{if} = B^{if}$, entonces, en media, n^{if} se incrementará en 1 unidad y se decrementará en 1 unidad por cada d^{if} requerimientos de entrada de sesiones PU en el sistema, con lo cual, el valor medio permanecerá constante.

Además, también en condiciones de tráfico estacionario, en las cuales $P^{ab} = B^{ab}$, entonces, en media, n^{ab} se incrementará en 1 unidad y se decrementará en 1 unidad por cada d^{ab} flujos SU procesados por el sistema, con lo cual, el valor medio permanecerá constante.

En cambio, en condiciones de tráfico no estacionario, o con un tiempo insuficiente de simulación, los umbrales se irán autoajustando hasta que finalmente se logren los objetivos, aunque es posible que en algunas circunstancias no se puedan conseguir los objetivos propuestos.

Para el Cálculo de las Probabilidades, se establecen dos supuestos:

- El supuesto de *probabilidades reales*, donde se emplean las probabilidades reales, tal y como se han definido en la Tabla 1.
- El supuesto de *probabilidades rápidas*, donde se fuerza la probabilidad de reducción de los umbrales, haciendo que se reduzcan de inmediato, o sea, con probabilidad 1. Ello conlleva variar las probabilidades restantes tal que en condiciones estacionarias el valor del objetivo y de la probabilidad en cuestión se mantenga igualado en media. Todo esto se puede ver en la Tabla 2.

EVENTO	CONDICION	ACCIÓN
Llegada PU	Si echa SU	{R \leftarrow R - 1} con probabilidad 1
	Si NO echa SU	{R \leftarrow R + 1} con probabilidad $n^{if} / (d^{if} - n^{if})$
Abandono SU	Si abandona	{F \leftarrow F - 1} con probabilidad 1
Servicio SU	Si sale con éxito	{F \leftarrow F + 1} con probabilidad $n^{ab} / (d^{ab} - n^{ab})$

Tabla 2: Esquema adaptativo para los umbrales de control de acceso, con *probabilidades rápidas*

Se ha considerado la implementación de las probabilidades rápidas, ya que así el sistema se adaptará más rápidamente a las variaciones del tráfico recibido, con lo cual esos serán los criterios implementados en el modelo.

En cuanto a la evaluación de los Controles de Admisión, R no influirá directamente en ningún evento, sino que actuará de forma preventiva para evitar que los flujos SU ocupen canales, favoreciendo que más sesiones PU entrantes puedan obtener un canal libre, lo que eventualmente reducirá la P^{bf} y aumentará la QoS percibida por las sesiones PU.

En este contexto, un valor pequeño de R implicará que hay muchas sesiones PU en el sistema, lo cual permitirá pocos canales para los flujos SU, de modo que el ancho de banda disponible para cada uno disminuirá, ya que se debe repartir el ancho de banda total de forma equitativa entre todos.

Alternativamente, un valor alto de R implicará que hay poca actividad por parte de las sesiones PU, lo cual es aprovechable para que los flujos SU puedan obtener más ancho de banda a través de la ocupación de más canales.

La variable R se autoajusta, en el sentido de que si R cae al valor mínimo, que será el mínimo número de canales reservados solo para SU, entonces no se producirán interferencias, con lo cual eventualmente R volverá a crecer. Por el contrario, si R aumenta mucho, entonces habrá más probabilidades de que se produzcan interferencias, con lo cual eventualmente R volverá a decrecer.

Este ciclo se repetirá dependiendo de las condiciones del tráfico, hasta que se llegue a las condiciones estacionarias, y en ese caso R deberá estabilizarse. En cambio, si nunca se llegasen a alcanzar dichas condiciones estacionarias, entonces nunca se estabilizaría R , como tampoco se podrían alcanzar los objetivos de probabilidad establecidos.

Respecto al Control de Admisión F , éste se evaluará a la llegada de un flujo SU, de modo que si el número de flujos SU en el sistema ya ha llegado al valor F , entonces un nuevo flujo SU entrante será rechazado. Y en caso contrario, será aceptado, aunque el ancho de banda asignado a cada flujo SU tendrá que ver con el factor de congestión, de modo que si no hay congestión, entonces cada flujo SU dispondrá de un canal en exclusiva para la transmisión, pero si hubiera congestión, entonces el ancho de banda total se dividiría a partes iguales entre todos los flujos SU.

En los momentos en los cuales aumente F , eso significará que se permitirán más flujos SU, aunque el ancho de banda dependerá del número de canales disponibles para SU en esos momentos, y de forma análoga, cuando disminuya F entrarán menos flujos SU.

La variable F también se autoajusta, de modo que si F cae hasta que factor de congestión es 1, o sea, cuando no hay congestión, entonces la variable impaciencia tendrá media 0, con lo cual cuando un flujo SU ocupe un canal SU completo, nunca se va a producir impaciencia. Mientras no se produzca el evento de impaciencia, se completarán todos los flujos, con lo cual eventualmente volverá a crecer F .

Por otra parte, si F aumenta mucho, entonces llegará un momento en que aparezca la congestión, y con ella el valor medio de la impaciencia empiece a tener valores positivos, y además, dichos valores generarán tiempos menores a medida que crezca el factor de congestión. Este hecho inducirá a que haya más probabilidades de que se produzcan abandonos por impaciencia, con lo cual eventualmente hará que F vuelva a decrecer.

Como en el caso de la R , este ciclo se repetirá dependiendo de las condiciones del tráfico, hasta que se den las condiciones estacionarias, y en ese caso F tenderá a estabilizarse. En cambio, si nunca se diesen dichas condiciones estacionarias, entonces nunca se estabilizaría F , de modo que tampoco se podrían alcanzar los objetivos de probabilidad establecidos.

En cuanto a los límites de F , éstos no se ven influenciados por el modo de probabilidades rápidas establecido. Es decir, no hay límites superiores en ningún caso, aunque por lo que se acaba de exponer será el propio esquema de Control de Acceso el que más pronto o más tarde rebaje los flujos SU , mientras que no se rebajará F cuando no hay congestión, lo cual implica que como mínimo habrá cero.

Por último, falta señalar dónde se van a realizar los aumentos probabilísticos de las variables R y F en el caso estático con valores fraccionales de los umbrales. Si se tiene en cuenta que F afecta directamente a las llegadas de nuevos flujos SU , el único sitio excluible sería ese, para evitar los efectos de la correlación entre los cambios en la variable y los eventos de llegada de flujos SU .

El lugar elegido ha sido la llegada de sesiones PU , y su mecanismo consiste en que cada vez que llegue una sesión primaria, se incrementarán en una unidad tanto R como F , de manera independiente, con cierta probabilidad, que será fijada en tiempo de ejecución, siempre y cuando mantengan sus valores originales. Y si a la llegada de una sesión primaria alguno de los valores ya se encuentra incrementado, entonces ese valor se decrementará con la probabilidad contraria a la fijada en tiempo de ejecución. Así, en media, se lograrán valores racionales para R y F en el caso estático.

IV.4. IMPLEMENTACION DEL MODELO ADAPTATIVO CON CANAL DE GUARDA

Tomando como base la implementación del algoritmo anterior, se ha procedido a modificarlo para que siempre haya un canal de guarda en el sistema, de modo que a la llegada de un PU nunca pueda haber interferencias. Este modelo se puede implementar con el mecanismo de Control de Acceso CAP, aunque con el mecanismo CAP con repacking los canales libres serán más fácilmente identificables.

Con esta variación se puede asegurar un aumento de la calidad de servicio en los PU , mientras que alternativamente se puede predecir un empeoramiento de la calidad de servicio en los SU , ya que ese canal que debe quedar libre (el canal de guarda), implica que los flujos SU tienen un canal menos al que poder acceder al sistema, con lo cual dispondrán de menor ancho de banda para su procesamiento.

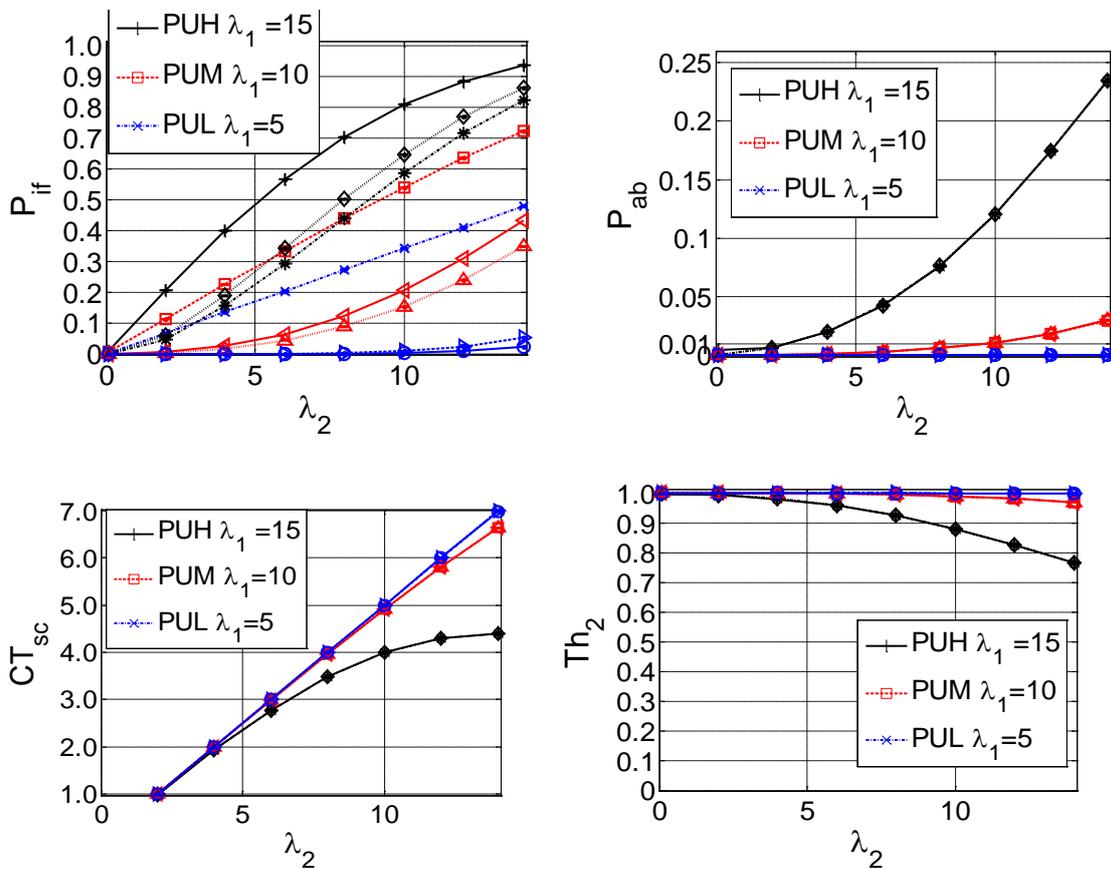
Hay un caso especial en el cual no se dejará dicho canal de guarda, y es cuando los PU ya hayan ocupado todos los canales a los cuales tengan derecho de acceso, es decir, todos los canales disponibles, exceptuando los canales reservados para los flujos secundarios.

Es importante señalar que este sistema mantiene los modos de operación implementados para el modelo anterior. Esto permite comparar los resultados obtenidos con ambos modelos, y según lo expuesto anteriormente, los resultados de este modelo mejorarán respecto a los PU, al tiempo que empeorarán para los SU.

Si se tiene en cuenta que los PU son los usuarios legítimos, entonces está justificado que se intente obtener la máxima calidad de servicio para ellos, de modo que se minimicen sus niveles percibidos de interferencia. Tal vez con este planteamiento se incentive a los propietarios de bandas espectrales a poner dicho espectro a disposición de otros usuarios secundarios a través de esquemas de Radio Cognitiva.

V.RESULTADOS

En primer lugar se ha simulado un sistema de Radio Cognitiva sin control de admisión alguno, de manera que los resultados obtenidos sirvan como línea de base para los resultados sucesivos.



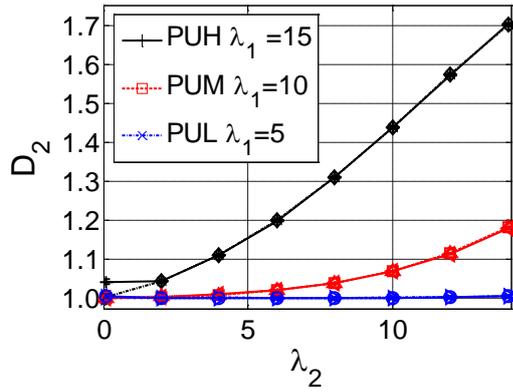


Figura 5: Línea de base, sin control de admisión

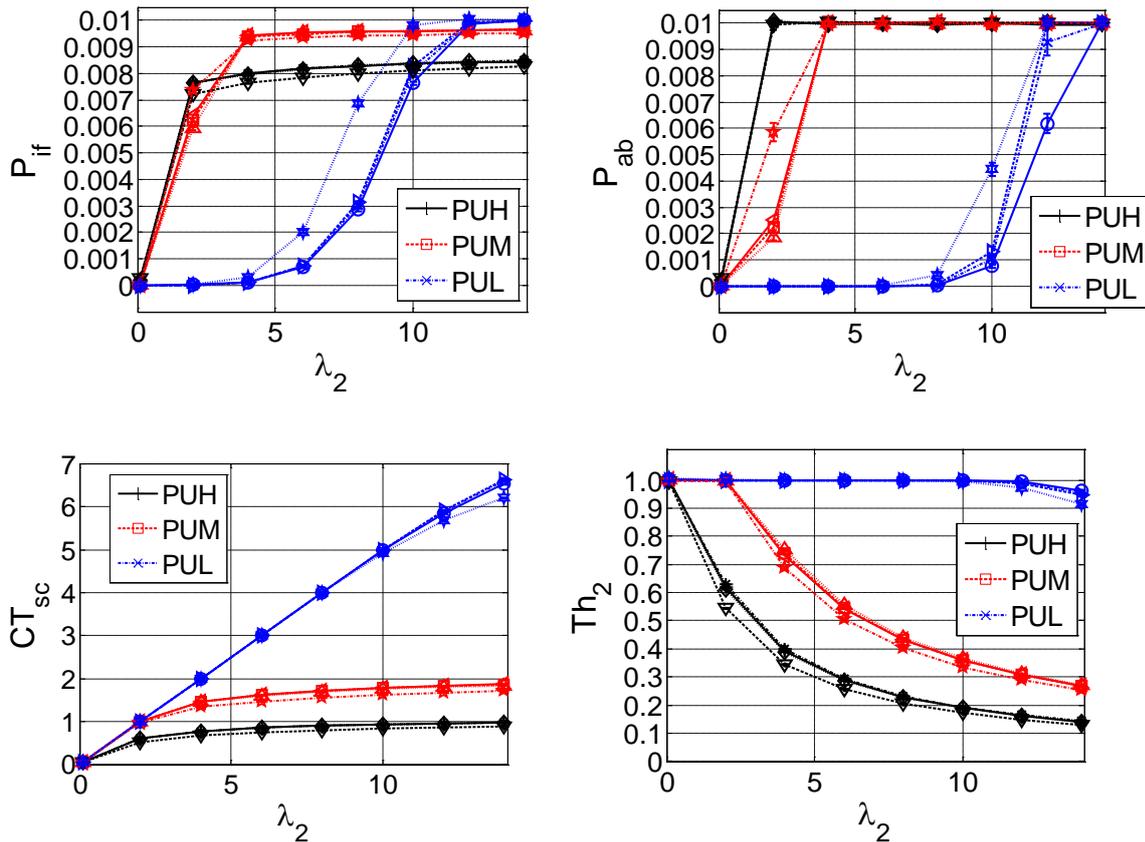
El objetivo último de este trabajo es reducir las probabilidades de interferencia y abandono hasta niveles aceptables, sin que se penalice el rendimiento del sistema. Para ello se han implementado 2 algoritmos adaptativos, cuyo rendimiento se va a comprobar. Se han simulado 3 tipos de carga en los primarios: alta (PUH: $\lambda_1=15$), media (PUM: $\lambda_1=10$) y baja (PUL: $\lambda_1=5$). Adicionalmente, en cada tipo se han implementado 3 mecanismos de acceso: aleatorio, CAP y CAP con preferencia, aunque solo se percibe esto en la gráfica de la P^{if} , donde la más elevada de cada color es el aleatorio, la central es CAP y la más baja es CAP con repacking.

Para comenzar, mediante el algoritmo adaptativo general, se han fijado unos objetivos de probabilidad $B^{if}=0.01$ y $B^{ab}=0.01$ y se han simulado las 3 condiciones de carga:

En las distintas gráficas se muestran los siguientes parámetros:

- la probabilidad de interferencia (P_{if}),
- la probabilidad de abandono (P_{ab}),
- el tráfico cursado por los SU (CT_{sc}),
- el caudal o throughput en los SU (Th_2)
- el retardo en los SU (D_2)

respecto a distintas cargas en los secundarios (λ_2)



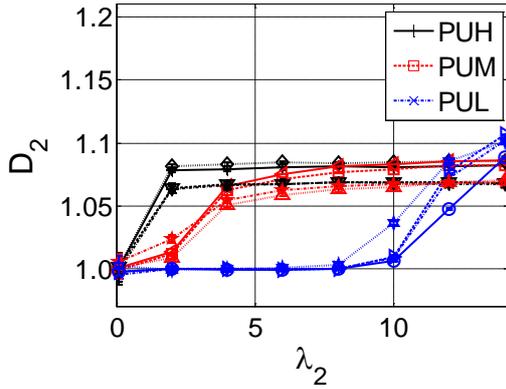


Figura 6: Algoritmo General: $B^{if}=0.01$ $B^{ab}=0.01$

En primer lugar, se aprecia que se cumplen estrictamente los objetivos de probabilidad fijados. Además, se nota una caída en las tasas de transmisión, sobre todo para las cargas más altas y en cuanto al retardo, éste se acota a valores más aceptables. Además en cada tipo se han simulado 3 distribuciones de procesos de llegada para los secundarios: exponencial, erlangiana e hiperexponencial, que prácticamente superponen.

Posteriormente se han fijado diferentes objetivos de probabilidad: $B^{if}=0.02$ y $B^{ab}=0.02$, $B^{if}=0.05$ y $B^{ab}=0.05$, $B^{if}=0.10$ y $B^{ab}=0.10$. También se hubieran podido variar para individualmente.

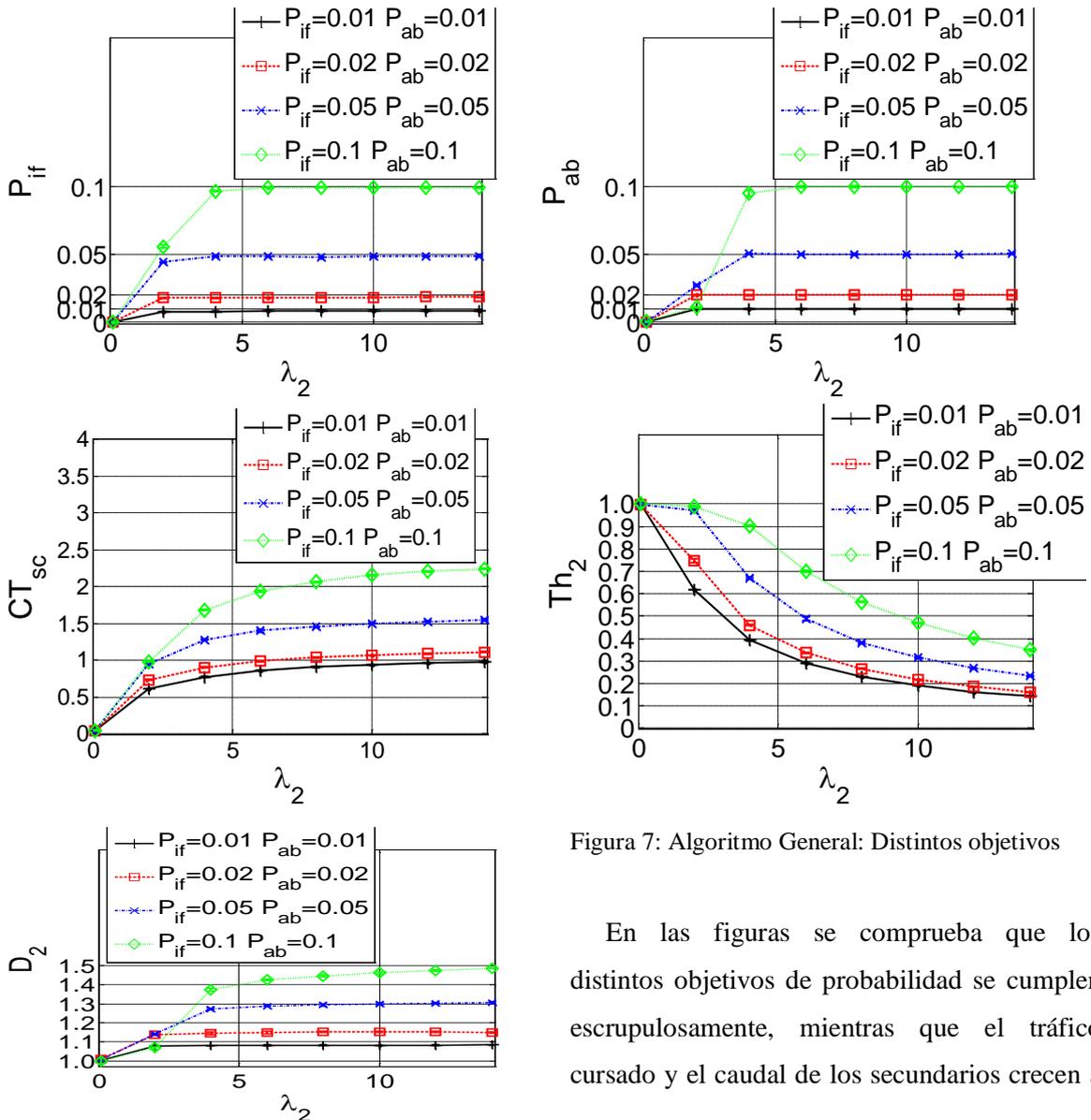


Figura 7: Algoritmo General: Distintos objetivos

En las figuras se comprueba que los distintos objetivos de probabilidad se cumplen escrupulosamente, mientras que el tráfico cursado y el caudal de los secundarios crecen a

medida que lo hacen las probabilidades, debido a que existe mayor disponibilidad para que más flujos ocupen más canales, mientras que el retardo se dispara respecto al caso anterior.

Respecto a la validación del algoritmo adaptativo, se ha realizado a través de los 2 métodos descritos anteriormente. En primer lugar, a lo largo de la simulación con $B^{if}=0.01$ y $B^{ab}=0.01$, y con tipo de carga de primario alta (PUH), se ha obtenido los valores medios de R y F mediante el método de las áreas, consistente en calcular el área encerrada bajo estas variables cada vez que hay un intervalo de actualización, y posteriormente dividiendo la cantidad total entre el tiempo efectivo de simulación, esto es, sustrayendo el tiempo de transitorio considerado.

Los valores obtenidos han sido racionales, y con ellos se ha ejecutado el caso estático con valores fraccionarios para los umbrales, obteniendo los siguientes resultados comparativos:

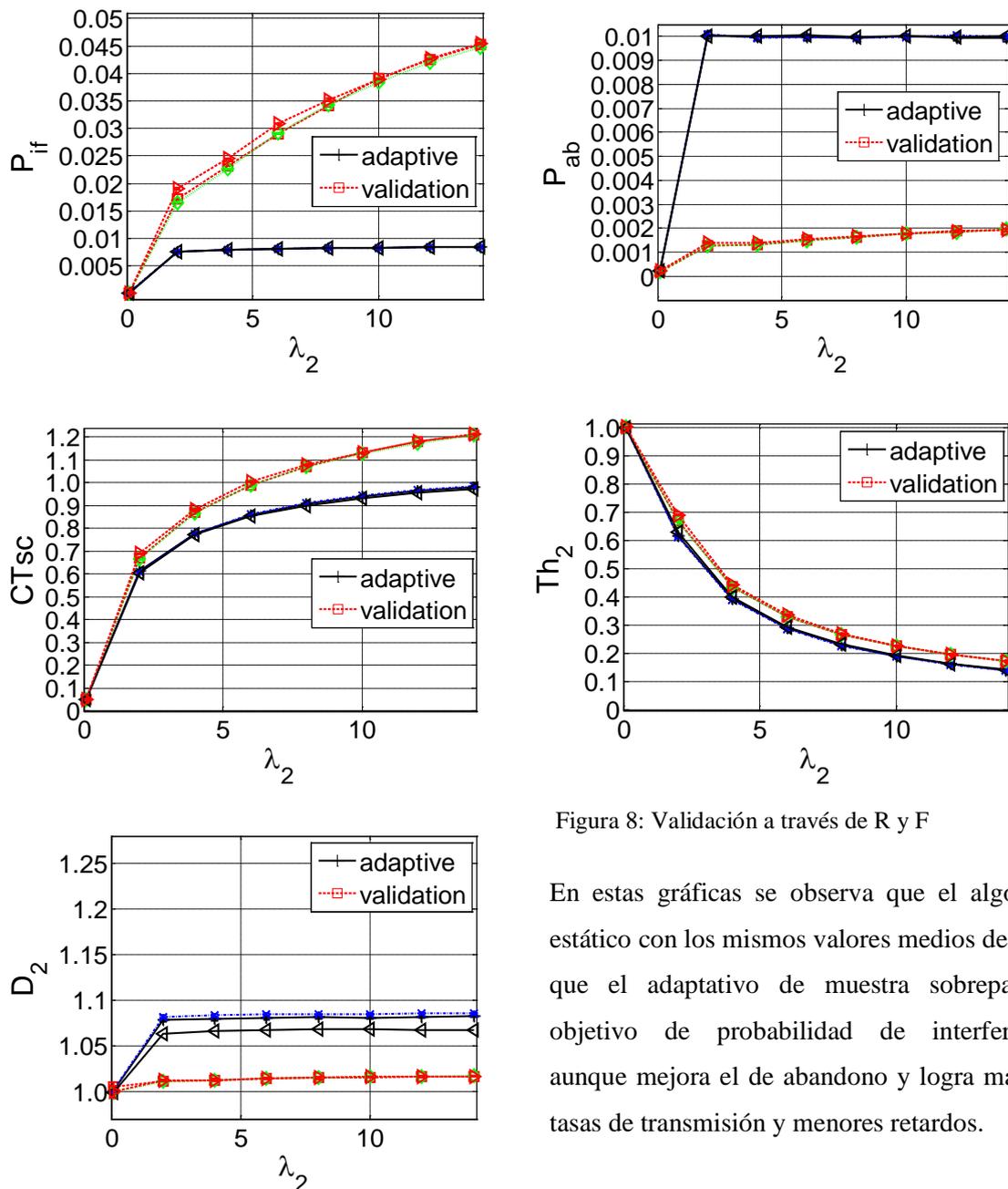


Figura 8: Validación a través de R y F

En estas gráficas se observa que el algoritmo estático con los mismos valores medios de R y F que el adaptativo de muestra sobrepasa el objetivo de probabilidad de interferencia, aunque mejora el de abandono y logra mayores tasas de transmisión y menores retardos.

A pesar de esto, se debe considerar que el caso adaptativo es mejor ya que la probabilidad de interferencia obtenida es hasta 5 veces más en el peor de los casos, lo cual ocasionará excesivos problemas en la comunicación. Y en cuanto al resto de parámetros, el caso adaptativo se ajusta a lo establecido para unas condiciones aceptables.

En cuanto al segundo método de validación del algoritmo adaptativo, se han anotado los valores de las probabilidades obtenidos para cada nivel de carga del secundario, y mediante el mecanismo de “prueba y error” se han localizado. Estos son los resultados comparativos:

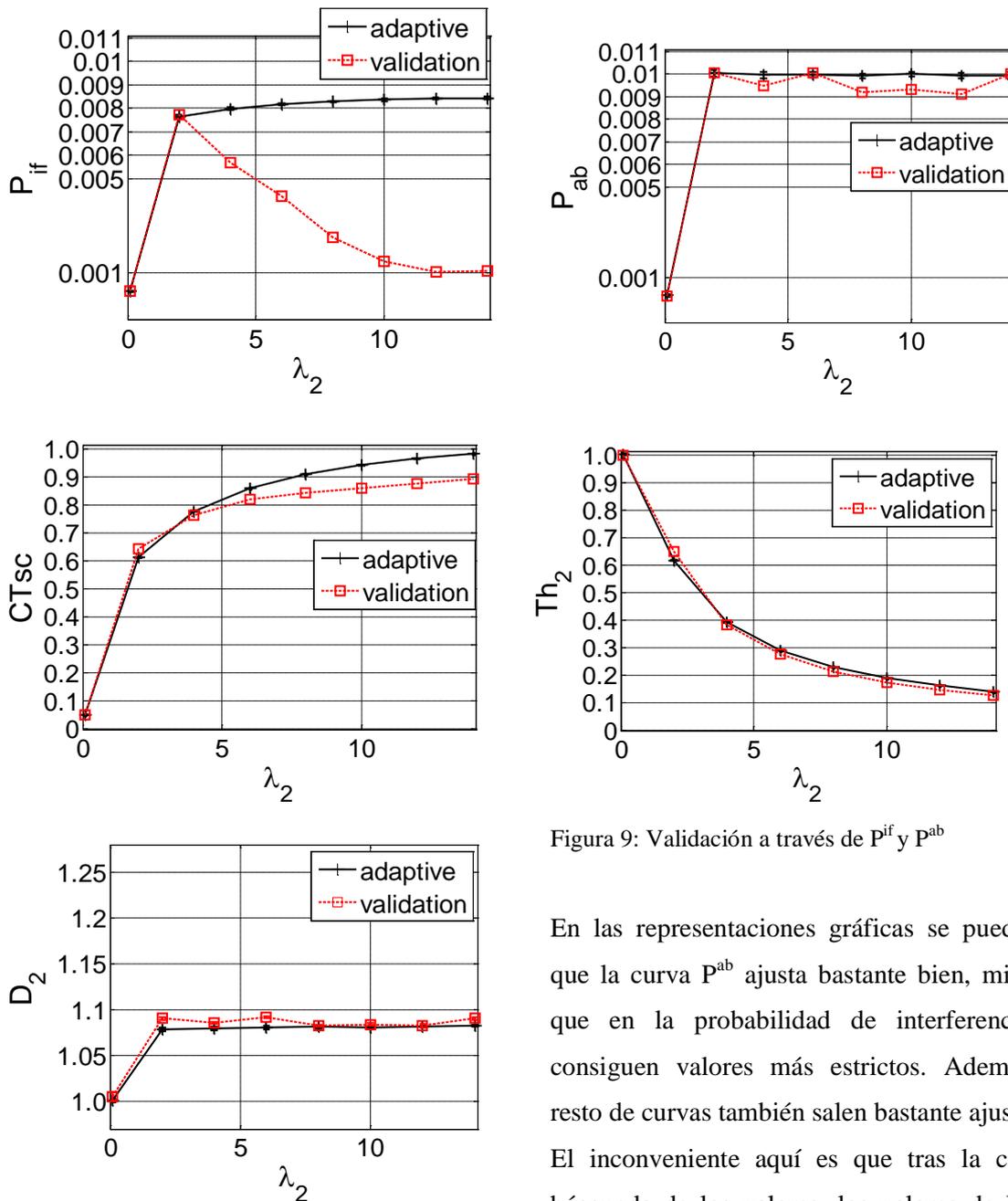


Figura 9: Validación a través de P^{if} y P^{ab}

En las representaciones gráficas se puede ver que la curva P^{ab} ajusta bastante bien, mientras que en la probabilidad de interferencia se consiguen valores más estrictos. Además, el resto de curvas también salen bastante ajustadas. El inconveniente aquí es que tras la costosa búsqueda de los valores, los valores de R y F que cumplen están entre 1 y 1.5, mientras que en el algoritmo adaptativo los de F son ligeramente superiores a ese rango, pero los de R están entre 7.5 y 9. Esto implica que para lograr los mismos

valores de probabilidad se debe restringir el número de canales a los cuales pueden acceder los secundarios.

Esta condición nos puede hacer ver que el algoritmo adaptativo consigue los objetivos establecidos sin tantas restricciones en el canal, lo cual nos permite afirmar que dicho algoritmo mejora las prestaciones del estático equivalente.

Tras haber validado el algoritmo anterior, hay que introducir el segundo algoritmo, que se caracteriza por tener un canal de guarda siempre que sea posible, de modo que se puedan evitar las interferencias causadas por los usuarios secundarios sobre los primarios, ya que cuando llegue un primario siempre encontrará un canal libre. Estas son las gráficas de rendimiento del sistema para unos objetivos de probabilidad $B^{if}=0.01$ y $B^{ab}=0.01$.

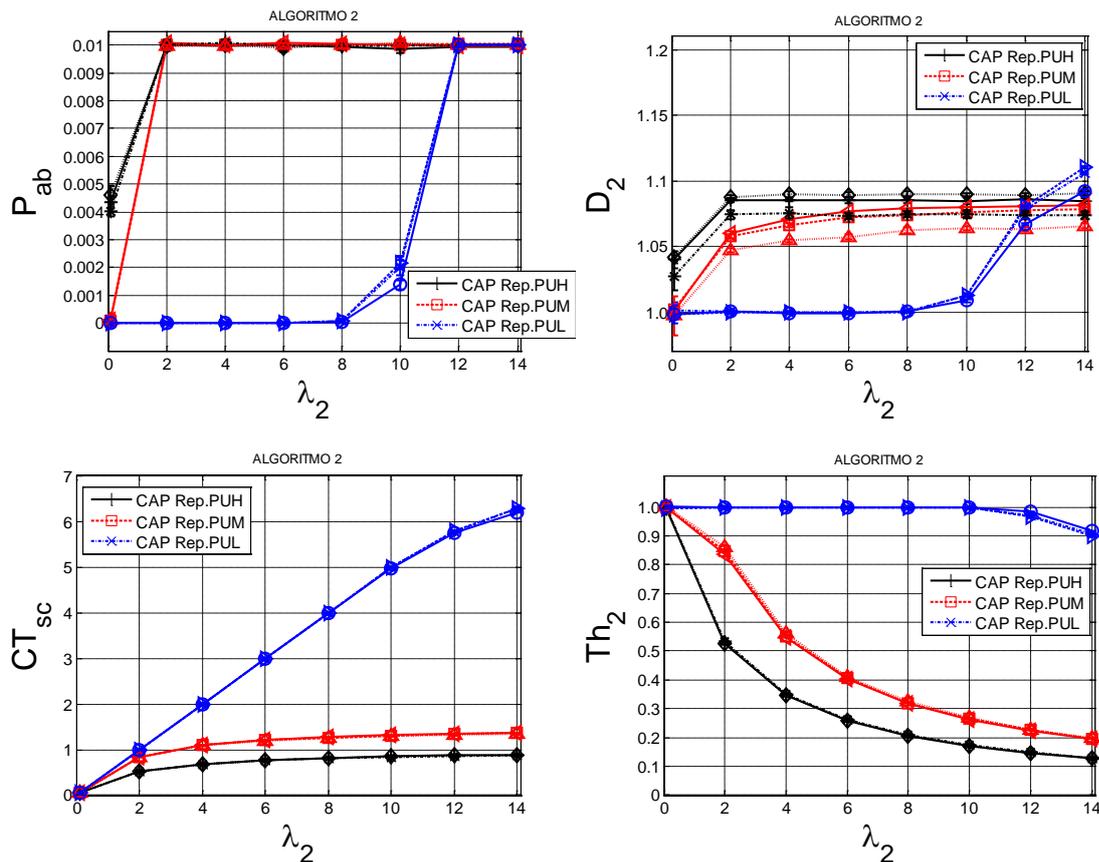


Figura 10: Algoritmo con canal de guarda, con $B^{if}=0.01$ y $B^{ab}=0.01$

En primer lugar, hay que destacar que no se ha incluido la gráfica de P^{if} porque es nula. Por otra parte se ve que se respetan los límites establecidos para la impaciencia y el resto de valores son aceptables.

Para este algoritmo no se debe emplear el modo de acceso aleatorio, ya que complica la implementación. Lo ideal sería el CAP con repacking, ya que facilita la gestión del canal libre frente al CAP. Precisamente las siguientes gráficas comparan el rendimiento de ambos modos de

acceso al sistema, funcionando con $B^{if}=0.01$ y $B^{ab}=0.01$, donde se aprecia que ambos métodos se solapan para los distintos niveles de carga en los secundarios para los 2 valores representados:

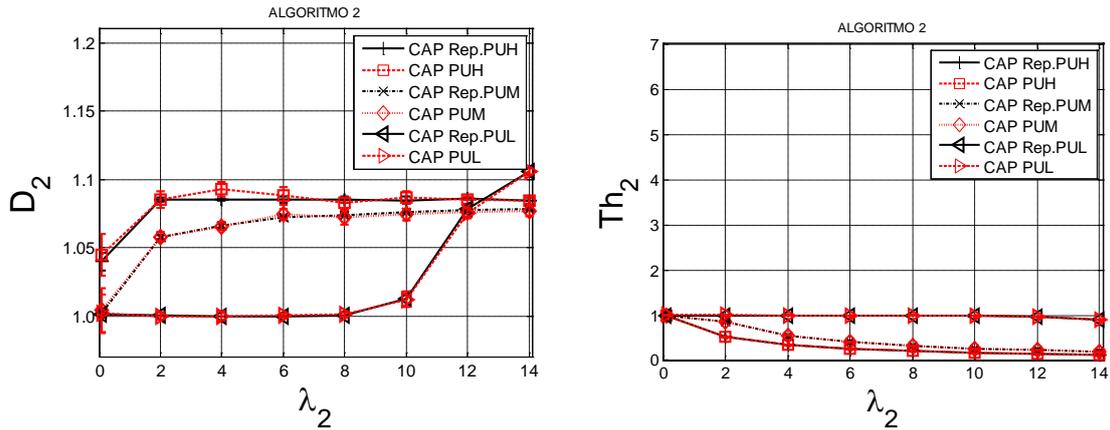
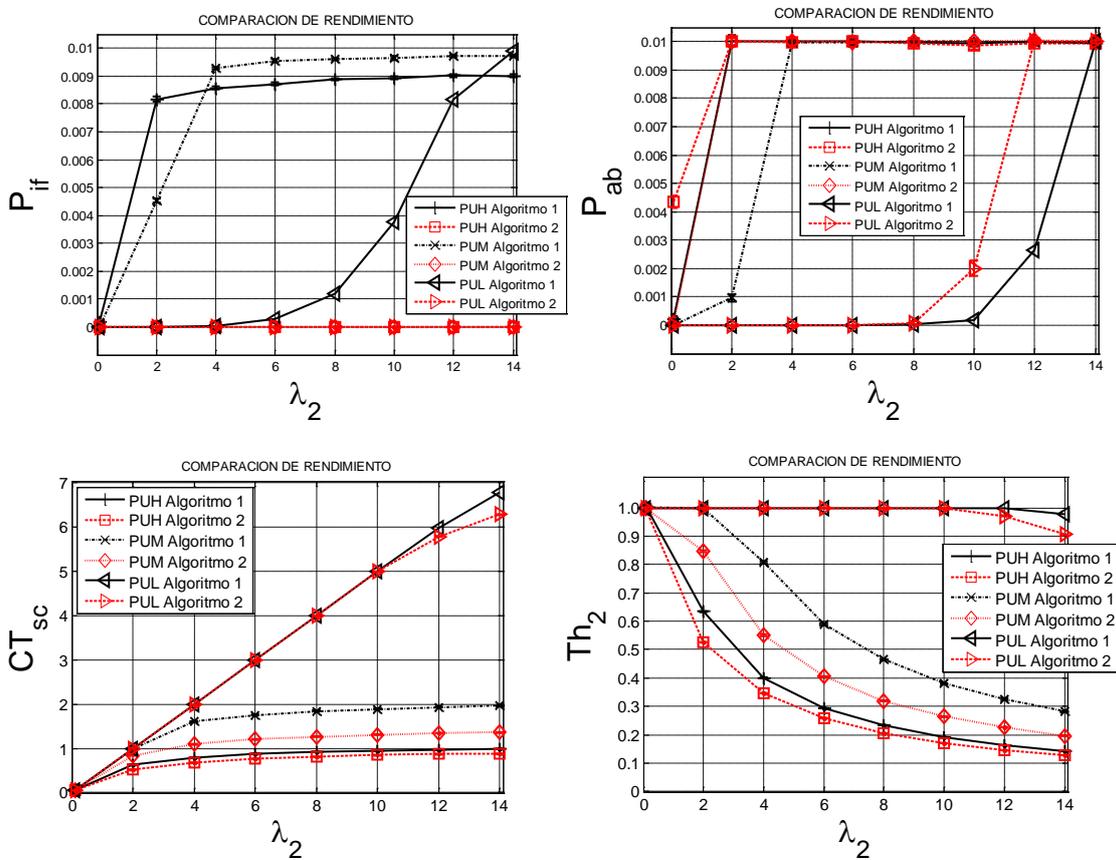


Figura 11: Comparación CAP y CAP con repacking en el algoritmo con canal de guarda

Finalmente resta comparar las prestaciones obtenidas con ambos algoritmos. Para ello se han considerado los diversos niveles de carga del secundario, con $B^{if}=0.01$ y $B^{ab}=0.01$.



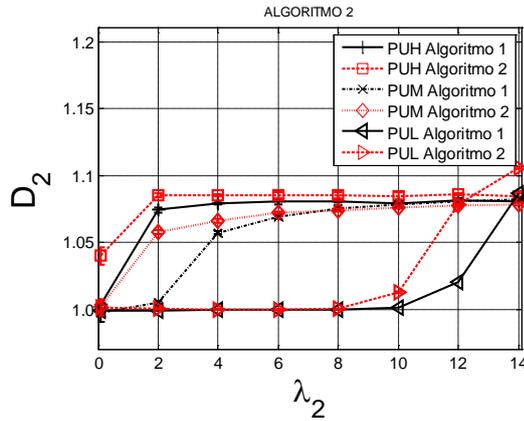


Figura 12: Comparación del rendimiento en los algoritmos CON y SIN canal de guarda

En vista de las gráficas anteriores, cabe señalar que ambos cumplen con los objetivos de probabilidad marcados, pero mientras que el algoritmo CON canal de guarda no experimenta interferencias, alcanza el objetivo de probabilidad de abandono con menor carga de secundarios.

Respecto al Tráfico Cursado en el secundario, el algoritmo SIN canal de guarda produce unos resultados ligeramente más altos para todos los niveles de carga, y lo mismo sucede con el caudal. Esto es debido a que el algoritmo con canal de guarda debe dejar un canal inutilizado para evitar las interferencias a la llegada de un primario, mientras que el otro algoritmo puede hacer un uso completo de los canales del sistema. Así mismo, los resultados del retardo indican que éste es algo superior en el algoritmo con canal de guarda, debido al motivo que se acaba de exponer.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la efectividad de un esquema adaptativo para el Control de Admisión e Interferencias en una red de Radio Cognitiva donde los usuarios secundarios cursan tráfico elástico. Para ello se han presentado 2 algoritmos que permiten variar de forma adaptativa unos umbrales para el número máximo de canales destinados a usuarios secundarios y el número máximo de usuarios admisibles de forma simultánea en el sistema, dependiendo de las condiciones del tráfico, y según unos objetivos previamente fijados.

Ambos algoritmos permiten mejorar la QoS percibida tanto por los usuarios primarios como por los secundarios de forma apreciable respecto a los casos donde se implementan algoritmos estáticos, cumpliendo en la mayoría de los casos con los objetivos probabilísticos fijados, ya sea para respecto a las interferencias percibidas por los primarios, como a los abandonos experimentados por los secundarios. Es destacable también la insensibilidad de los resultados frente a las distribuciones de llegada y servicio de los usuarios o las longitudes de los flujos.

Finalmente cabe destacar que el algoritmo con canal de guarda anula las interferencias aunque como contrapartida pierde caudal de transmisión y gana en retardo respecto al modelo sin canal de guarda, ya que en este último caso se puede aprovechar ese canal adicional para transmitir.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi tutor, Jorge Martínez, su ayuda para la consecución de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Ian F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, Shantidev Mohanty, *NeXt Generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey*, Elsevier, 2006
- [2] Joseph Mitola III and Gerald Q. Maguire Jr., *Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal*, IEEE Personal Communications, vol.6, no.4, August 1999
- [3] Joseph Mitola III, *Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio*, PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, May 2000
- [4] Joseph Mitola III, *Cognitive Radio Architecture*, Wiley, October 2006
- [5] FCC, ET Docket No 03-222, *Notice of proposed rule making and order*, December 2003
- [6] S. Haykin, *Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 23, No. 2, February 2005
- [7] K.C.Chen, Y.J.Peng, N.Prasad, Y.C.Liang, S.Sun, *Cognitive Radio Network Architecture: Part I – General Structure*, ACM ICUIMC, Seoul, 2008
- [8] K.C.Chen, Y.J.Peng, N.Prasad, Y.C.Liang, S.Sun, *Cognitive Radio Network Architecture: Part II – Trusted Network Layer Structure*, ACM ICUIMC, Seoul, 2008
- [9] *IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks*, July 2011
- [10] Carlos Cordeiro, Kiran Challapali, and Dagnachew Birru, *IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.1, No.1, Abr. 2006
- [11] FCC, ET Docket 10-174, *Second memorandum opinion and order, in the matter of unlicensed operation in the TV broadcast bands and additional spectrum for unlicensed devices below 900 MHz and in the 3 GHz band*, 2010
- [12] Tevfik Yücek and Hüseyin Arslan, *A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications*, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.11, No.1, First Quarter 2009
- [13] Ying-Chang Liang, Yonghong Zeng, Edward C.Y. Peh, Anh Tuan Hoang, *Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks*, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.7, No.4, April 2008
- [14] Sina Maleki, Ashish Pandhripande, Geert Leus, *Two-Stage Spectrum Sensing for Cognitive Radios*, International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, March 2010
- [15] Tingting Jiang, Tongtong Li and Jian Ren, *Towards Secure Cognitive Communications in Wireless Networks*, IEEE Wireless Communications, Vol.19, No.4, August 2012
- [16] Ruiliang Chen, Jung-Min Park, and Jeffrey H. Reed, *Defense against Primary User Emulation Attacks in Cognitive Radio Networks*, IEEE journal on selected areas in communications, Vol. 26, No. 1, Jan. 2008
- [17] J.Elias, F.Martignon, *Joint Spectrum Access and Pricing in Cognitive Radio Networks with Elastic Traffic*, IEEE International Conference on Communications (ICC), May 2010

- [18] J.R.Vidal, V.Pla, L.Guijarro, J.Martinez-Bauset, *Flexible Dynamic Spectrum Allocation in Cognitive Radio Networks Based on Game-theoretical Mechanism Design*, NETWORKING 2011 - 10th International IFIP TC 6 Networking Conference, May 2011
- [19] Ivan Stojmenovic, Mahtab Seddigh, Jovisa Zunic, *Dominating Sets and Neighbor Elimination-Based Broadcasting Algorithms in Wireless Networks*, IEEE Press, January 2002
- [20] Zhiyong Lin, Hai Liu, Xiaowen Chu, Yiu-Wing Leung, Ivan Stojmenovic, *Maximizing Lifetime of Connected-Dominating-Set in Cognitive Radio Networks*, NETWORKING 2012 - IFIP International Federation for Information Processing 2012, August 2012
- [21] V.Pla, V.Casares-Giner, *Analysis of priority channel assignment schemes in mobile cellular communication systems: a spectral theory approach*, Performance Evaluation, vol.59. No.2-3, Feb.2005
- [22] L.Yang, L.Cao, H.Zheng, *Proactive channel access in dynamic spectrum network*, Physical Communication, Vol.1, No.2, June 2008
- [23] I.F.Akyildiz, W.Lee, M.Vuran, S.Mohanty, *A survey on spectrum management in cognitive radio networks*, IEEE Communications Magazine, Vol.46, No.4, April 2008
- [24] A.Gashemi, E.Sousa, *Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs*, IEEE Communications Magazine, Vol.46, No.4, April 2008
- [25] W.Y.Lee, I.F.Akyildiz, *Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks*, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.7, No.10, October 2008
- [26] A.T.Hoang, Y.C.Liang, M.H.Islam, *Power Control and Channel Allocation in Cognitive Radio Networks with Primary Users' Cooperation*, IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol.9, No.3, March 2010
- [27] J.Martinez-Bauset, V.Pla, M.Domenech-Benlloch, D.Pacheco-Paramo, *Admission Control and Interference Management in Dynamic Spectrum Access Networks*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol.2010, Article ID 708029, June 2010
- [28] X.Zhu, L.Shen, T.Yum, *Analysis of cognitive radio spectrum access with optimal channel reservation*, IEEE Communication Letters, Vol.11, No.4, April 2007
- [29] R.Ramjee, R.Nagarajan, D.Towsley, *On optimal call admission control in cellular networks*, Wireless Networks Journal (WINET), Vol.3, No.1, March 1997
- [30] D.García-Roger, M.J.Domenech-Benlloch, J.Martínez-Bauset, V.Pla, *Adaptive admission control in mobile cellular networks with streaming and elastic traffic*, in 20th International Teletraffic Congress (ITC-20), Ottawa, Canada, June 2007
- [31] J.Martinez-Bauset, Alexandru Popescu, V.Pla, A.Popescu, *Cognitive Radio Networks with Elastic Traffic*, 8th Euro-NF Conference on Next Generation Internet (NGI), June 2012
- [32] E.Wong, C.Foh, *Analysis of cognitive radio spectrum access with finite user population*, IEEE Communications Letters, Vol.13, No.5, May 2009
- [33] T.Bonald, J.W.Roberts, *Congestion at flow level and the impact of user behavior*, Computer Networks, Vol.42, No.4, Julio 2003
- [34] M.H.MacDougall, *Simulating Computer Systems: Techniques and Tools*, Computer Systems Series, the MIT Press, July 1987
- [35] J.Martinez-Bauset, V.Casares-Giner, *Conmutadores de Paquetes. Arquitectura y Prestaciones*, Editorial UPV, 2005