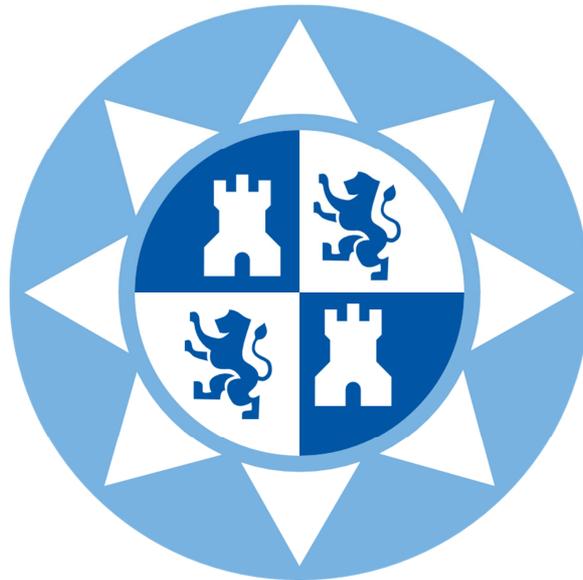


Proyecto Fin de Carrera

Reutilización de espectro en redes celulares mediante oportunidades temporales y espaciales

José Antonio Ayala Romero

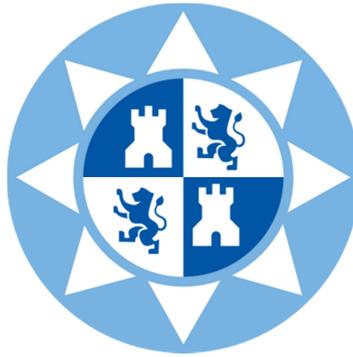
Director: Juan José Alcaraz Espín



Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación

Junio de 2014



Autor	José Antonio Ayala Romero
E-mail del autor	jayalaromero@gmail.com
Director	Dr. Juan José Alcaraz Espín
E-mail del director	juan.alcaraz@upct.es
Título del PFC	Reutilización de espectro en redes celulares mediante oportunidades temporales y espaciales
Descriptores	Spectrum reuse, cognitive radio, cellular systems
Resumen	<p>Los operadores de redes celulares normalmente deben mantener las redes durante varias generaciones (2G, 3G, 4G,...) de forma simultánea. La constante actualización de los terminales de los usuarios hace que el espectro de las redes más antiguas quede infrutilizado. Los operadores pueden usar técnicas de radio cognitiva en sus redes más actuales para reutilizar el espectro de sus propias redes más antiguas.</p> <p>Este proyecto propone un esquema de acceso híbrido para redes celulares que combina acceso secundario sobre oportunidades temporales y espaciales. Se demuestra que, cuando se considera una estructura celular con reutilización de frecuencia, las oportunidades espaciales se caracterizan con un teselado dual. Los resultados muestran que una estrategia de acceso aleatoria maximiza la capacidad de la red secundaria.</p>
Titulación	Ingeniero de Telecomunicación
Departamento	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de presentación	Junio 2014

ÍNDICE

1. Introducción.....	5
1.1.- Motivación del estudio.....	5
1.2.- Radio cognitiva. Principios básicos.....	5
1.3.- Jerarquía de usuarios.....	6
1.5.- Radio cognitiva y redes celulares.....	7
1.5.- Objetivos.....	7
1.6.- Estructura de contenido.....	8
2. Trabajos Relacionados.....	9
3. Escenario Básico.....	12
3.1.- Introducción.....	12
3.2.- Modelo del sistema.....	12
3.2.1.- Introducción.....	12
3.2.2.- Protocolo de la red primaria.....	13
3.2.3.- Espectro en la red secundaria y limitaciones hardware.....	14
3.2.4.- Protocolo de la red secundaria.....	15
3.2.5.- Colisiones.....	15
3.2.5.1.- Colisión por fallo de escaneo por parte del SU.....	16
3.2.5.2.- Colisión por llegada de un PU a un canal ocupado por un SU.....	16
3.2.6.- Modelo de canal de comunicaciones.....	16
3.2.7.- Distribución de potencias.....	17
3.3.- Análisis de resultados.....	17
3.3.1.- Introducción.....	17
3.3.2.- Escenario básico 1.....	19
3.3.3.- Escenario básico 2.....	24
3.3.4.- Comparación de resultados.....	26
3.4.- Conclusiones.....	30
4.- Acceso Híbrido a Redes Celulares. Descripción del sistema.....	32
4.1.- Introducción.....	32
4.2.- Tipos de acceso secundario.....	33
4.2.1.- Acceso secundario en oportunidades temporales.....	33
4.2.2.- Acceso secundario sobre oportunidades espacial: teselado dual.....	34
4.2.2.1.- Definición de celda dual.....	35
4.2.2.2.- Ejemplo.....	36
4.2.3.- Acceso híbrido.....	38
4.3.- Formulación del problema.....	41
5. Evaluación de Rendimiento.....	44
5.1.- Introducción.....	44

5.2.- Modelo de canal	44
5.2.1- Piecewise Lineal (Multi-slope) Model.....	44
5.2.2.- Piecewise Dual-Slope	45
5.3.- Generación de tráfico	45
5.4.- Comunicaciones secundarias.....	46
5.5.- Decisión de transmisión	46
5.6.- Cálculo de los estimadores de rendimiento	48
6. Análisis de Resultados	52
6.1.- Resultados de la evaluación numérica.....	52
6.2.- estimación del ρ óptimo.....	58
6.2.1.- Ejemplo	58
6.3.- Conclusiones	60
Bibliografía.....	61

1. INTRODUCCIÓN

1.1.- MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

El espectro radio eléctrico es uno de los recursos más importantes que se requieren para las radiocomunicaciones. La utilización de este espectro está regulada alrededor de todo el mundo para la puesta en marcha de servicios, protegiéndolo así de interferencia. Esta regulación de espectro es realizada por entidades regulatorias como la European Telecommunications Standards Institute (ETSI) en Europa o la Federal Communications Commission (FCC) en US. Estas entidades asignan licencias de bloques de espectro a determinadas compañías.

Aunque que estas estrategias de asignación estática de espectro funcionan, y gracias a ellas se proveen servicios como telefonía celular, radio broadcast etc, no quedan bandas disponibles para nuevas aplicaciones emergentes. Por otro lado, un gran número de estudios indica que el espectro radioeléctrico está enormemente infrautilizado [4].

Esto sugiere que un dispositivo radio de más alta tecnología podría ser capaz de explotar este espectro infrautilizado. Por tanto, la primera motivación de la radio cognitiva es acceder de forma oportunista al espectro (a las oportunidades espectrales) para hacer un uso más eficiente del mismo y así mitigar la escasez de bandas frecuenciales disponibles. Otro beneficios asociado a este uso más eficiente, es la posibilidad de implementar servicios que requieran una gran tasa de datos y un gran ancho de banda en el futuro.

1.2.- RADIO COGNITIVA. PRINCIPIOS BÁSICOS

Radios cognitiva es un término usado generalmente para describir un dispositivo radio que es consciente del entorno en el que se encuentra y puede adaptar sus transmisiones en consonancia con el mismo. Por tanto, un dispositivo de radio cognitiva puede reconocer los sistemas o servicios que se han desplegado alrededor suyo y ajustar así sus parámetros de transmisión, para acceder así a estos recursos.

Una característica importante de las radios cognitivas es su agilidad en varios aspectos [2]:

- **Agilidad espectral.** Se refiere a la capacidad de encontrar espectro disponible y oportunidades de transmisión en ese espectro. Para ello se requiere el diseño de los

algoritmos y protocolos apropiados para la selección de frecuencias, coordinación y cooperación. También se refiere a la capacidad de escanear el espectro.

- **Agilidad de tecnología.** Supone que un mismo dispositivo es capaz de usar diferentes tecnologías de acceso. Así puede haber interoperabilidad entre múltiples plataformas radio, como por ejemplo WIFI, Bluetooth y GPS.
- **Agilidad de protocolos.** Se refiere a la capacidad de tener una pila de protocolos dinámica y reconfigurable que es capaz de adaptarlos en función de los dispositivos con los que interactúa.

Las redes de radio cognitiva usan dispositivos de radio por software (software defined radio, SDR) para implementar un acceso dinámico al espectro (dynamic spectrum access, DSA) mediante algoritmos que explotan la variabilidad temporal y espacial del mismo de muy diversas formas.

1.3.- JERARQUÍA DE USUARIOS

Debido a que el uso de radio cognitiva implica un uso oportunista del espectro, lo que puede suponer el uso de múltiples bandas, es necesario clasificar a los usuarios de forma jerárquica. Esta clasificación está basada en la licencia del espectro que van a usar los usuarios. Por tanto, los usuarios cognitivos que acceden de forma oportunista al espectro se denominan *usuarios secundarios* (Secondary Users, SUs). Por otro lado, los usuarios que poseen la licencia de ocupar la banda frecuencial referida son denominados como *usuarios primarios* (Primary Users, PUs). Los usuarios secundarios se comunican o sobre una infraestructura, o con otros usuarios secundarios, pero siempre sin interferir en las comunicaciones primarias activas. Un ejemplo de esto se puede ver en la operación de los usuarios secundarios en la banda de TV. El usuario primario es el receptor que trabaja en la banda de TV con licencia. Esta banda es usada de forma intermitente y depende de la programación del canal de televisión. Un usuario secundario podría escanear el espectro y usar una banda de frecuencia que no estuviera siendo usada en un determinado momento. Es importante que si el canal de televisión vuelve a emitir por esa frecuencia, el usuario secundario debe dejarla libre para no interferir en la transmisión primaria, ya el usuario primario es el único que tiene acceso a la banda de forma legítima. Este ejemplo se puede aplicar a cualquier red, donde coexisten usuarios primarios y secundarios.

1.5.- RADIO COGNITIVA Y REDES CELULARES

Desde principios de los noventa, nuevas generaciones de redes de acceso celulares se han ido desarrollando cada década. Sin embargo, no todos los usuarios migran siempre a la tecnología actual al mismo tiempo. Por ello, los operadores deben mantener sus redes antiguas operativas, aunque el espectro asignado a esas redes de acceso cada vez está más infrautilizado.

Una forma de aumentar la eficiencia espectral es dejar a los terminales de las redes más nuevas acceder de forma oportunista al espectro de las redes antiguas. Esto es, aplicando los conceptos de radio cognitiva, los clientes de las redes más avanzadas podrían ser los usuarios secundarios (SUs), los clientes de las redes antiguas podrían ser los usuarios primarios (PUs). La degradación causada por el acceso secundario a la red primaria no debería ser apreciable. Se asume que no hay señalización entre la red primaria y los SUs, por lo que el operador podría establecer reglas para el acceso secundarios.

Se considera que los SUs establecen conexiones ad-hoc entre ellos, lo que se denomina pares cognitivos. Las redes ad-hoc posibilitan múltiples aplicaciones como dispositivos repetidores, para incrementar la cobertura 4G en interiores, comunicaciones dispositivo a dispositivo, o el incremento del ancho de banda de una celda descargando la banda frecuencial principal.

Normalmente, el espectro secundario se basa en la ocupación o de oportunidades temporales, o de oportunidades espaciales. En este proyecto se propone el uso de ambas estrategias de forma simultánea, combinando ambas técnicas en una estrategia de acceso híbrido.

1.5.- OBJETIVOS

Por tanto, el objetivo del proyecto es diseñar y evaluar un esquema de acceso secundario a la red primaria usando tanto oportunidades temporales (para usuarios que se encuentran en la celda asociada a la banda en la que transmiten), como oportunidades espacial (para usuarios que se encuentran en celda duales). En primer lugar es necesario definir cada tipo de acceso, y decidir de qué forma los usuarios secundarios acceden a un tipo u otro de oportunidades espectrales. Para ello hay que definir unas medidas de rendimiento que dan información acerca del desempeño del sistema. Así, se pretende optimizar el rendimiento de los usuarios secundario sin causar prejuicios apreciables en las comunicaciones primarias. Debido a la complejidad de los procesos markovianos asociados al modelo propuesto, se obtienen resultados mediante evaluación numérica.

1.6.- ESTRUCTURA DE CONTENIDO

A continuación se presenta la estructura del contenido del proyecto que se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 2. Trabajos Relacionados. Se mencionan los trabajos publicados hasta la fecha relacionados con la temática del proyecto. Estos trabajos tratan principalmente sobre acceso temporal y/o espacial de secundarios, redes celulares, etc.

Capítulo 3. Escenario Básico. En este capítulo se muestra una primera aproximación al problema donde no se evalúa una red celular si no dos celdas aisladas. Los resultados obtenidos son usados para el diseño del sistema completo.

Capítulo 4. Acceso Híbrido a Redes Celulares. Descripción del sistema. Se aborda la descripción del sistema a evaluar, desarrollando el acceso temporal e híbrido. También se definen las medidas de rendimiento.

Capítulo 5. Evaluación de Rendimiento. Se abordan todos los detalles asociados a la evaluación numérica: modelo de canal, generación de tráfico, etc.

Capítulo 6. Análisis de resultados. Se muestran los resultados de la evaluación numérica, encontrando los parámetros que optimizan el sistema, y se extraen una serie de conclusiones.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En este capítulo se mencionan algunos de los trabajos más relevantes relacionados con este proyecto. Por último se comentan las aportaciones del mismo en relación a los trabajos previos.

Hay muchos trabajos que proponen el uso de **oportunidades temporales** para explotar el espectro como [8], [11] y [12]. En particular, HC-MAC [8] tiene en cuenta además las limitaciones hardware de los dispositivos secundarios, ya que es frecuente asumir dispositivos secundarios con posibilidad de escaneo y transmisión simultánea, gran ancho de banda de transmisión etc.

Así, HC-MAC propone un esquema de escaneo y transmisión secuencial. Se van escaneando los canales uno a uno, para después transmitir por los canales que se han encontrado libres. Las limitaciones hardware que asume HC-MAC (restricción de escaneo y restricción de transmisión) se tienen en cuenta para el desarrollo del modelo de sistema del escenario básico (capítulo 3).

Por otro lado, en [12] se desarrolla un protocolo con el que se explotan oportunidades temporales en la banda de GSM, teniendo en cuenta las particularidades de este protocolo de acceso. Para ello, es necesario el escaneo no solo de las diferentes portadoras, sino también de los diferentes canales temporales dentro de cada una de ellas, ya que cada portadora se divide en 8 slots temporales.

Otros trabajos proponen el acceso oportunista al espectro mediante **oportunidades espaciales**, es decir, el uso de una determinada frecuencia cuando el secundario se encuentra lo suficientemente lejos como para no interferir de manera significativa en las comunicaciones primarias. Este es el caso de [5], [6] y [7].

En [5] se buscan posiciones de los SUs en las que transmitiendo por las mismas frecuencias que los PUs y de forma simultánea, la degradación de las comunicaciones primarias esté por debajo de un umbral. Para ello, se ajusta la distancia mínima a partir de la cual un SU puede transmitir por esos canales (cuan alejado debe estar como mínimo). Así, se busca un compromiso entre PUs y SUs, reduciendo el radio de la celda primaria y acotando la potencia de transmisión de los SUs de tal forma que la SINR de los PUs no supere cierto umbral. Esto se evalúa en primer lugar con un solo secundario para después generalizarlo con múltiples SUs.

La **combinación del escaneo temporal y espacial** se estudia en [13], [14], [15] y [16].

En [13] y en [14] se considera un único transmisor secundario que explota la información del escaneo espacial para mejorar el rendimiento en el escaneo temporal.

En [13] se propone un escaneo colaborativo donde todos los nodos aportan información sobre el escaneo al fusion center. Se define el parámetro MIFTP (maximum interference-free transmit power) como la máxima potencia que puede transmitir un SU en una ubicación determinada. Así, mediante este esquema de escaneo, si un PU está inactivo los SUs pueden transmitir por ese canal con su máxima potencia. En caso contrario, cuando un PU está activo, los secundarios estiman de forma colaborativa la localización y la potencia transmitida de este PU para así estimar el MIFTP. Además, la información sobre la localización del usuario primario es usada a la hora de contrastar las informaciones provenientes de los diferentes SUs en el fusion center, minimizando así la correlación entre nodos.

En [14] también se propone un escaneo bidimensional (temporal y espacial) que explota correlaciones en tiempo y espacio simultáneamente. Así se propone un esquema de control de potencia distribuido basado en escaneo en el cual cada SU determina su MIFTP analizando la información binaria de detección tanto suya como de sus vecinos.

El modelo de un solo transmisor es también aplicado en [15] para redes vehiculares. Se define listen-before-talk (LBT) como la política de uso de oportunidades temporales, es decir, transmisión tras el escaneo y constrained-talk-without-listen (CTWL) como la política de uso de oportunidades espaciales, por la que se puede transmitir limitando la potencia de transmisión sin escanear los canales. Así, cuando un SU se encuentra en el radio del transmisor primario podrá usar LBT y cuando está suficientemente alejado, entonces puede elegir entre LBT y CTWL. Teniendo en cuenta que cuando un SU se aleja pierde la precisión en el escaneo y aumenta la probabilidad de falsa alarma, se encuentra por evaluación numérica la distancia a partir de la cual es óptimo usar LBT o CTWL.

Este modelo de un único transmisor secundario no es aplicable a redes celulares, ya que estas constan de múltiples estaciones base en una red celular y con reutilización de frecuencias.

En [16] la capacidad secundaria es optimizada aleatorizando la estrategia de acceso a una banda frecuencial, también para un escenario con un único PU y un único SU.

En cuanto a **redes celulares**, hay algunos trabajos previos como [6] y [7]. En estos trabajos se hace uso de oportunidades espaciales en redes celulares con reutilización de frecuencias.

Concretamente en [6] se propone un sistema celular con reutilización de frecuencias que, además de tener en cuenta las interferencias provocadas por los usuarios secundarios, también tiene en cuenta la interferencia co-canal debido a la reutilización de frecuencias en

otras celdas. La interferencia co-canal es la suma de la potencia que llega de todas las celdas que usan la misma banda frecuencial y varía modificando el factor de reutilización de la red, (que es un parámetro de diseño de la red celular) y la potencia de transmisión de las estaciones base. Así, al igual que en [5], se reduce el radio de la celda primaria y se halla una distancia mínima a partir de la cual se les permite a los SUs transmitir por la misma frecuencia que la celda primaria. Esta distancia mínima se calcula en función de la interferencia co-canal y de cuanto se ha reducido el radio de la celda primaria. Con todo esto se asegura que los PUs tengan la misma SINR que en el caso en el que no hay SUs y no se haya reducido el radio de la celda primaria.

Por otro lado es necesario cerciorarse de la magnitud de la capacidad secundaria para determinar si es suficiente para una aplicación específica. En [7] se estudia la capacidad de los secundarios para el escenario propuesto en [6] y se obtiene que se puede conseguir un sum-rate sustancial si los SUs se comunican en distancias cortas. Además, cuando hay pocas comunicaciones secundarias el sum-rate se incrementa linealmente con el número de enlaces secundarios, pero si el número de comunicaciones sigue aumentando la oportunidad espectral se satura y se producen interferencias entre secundarios bastante importantes.

Tanto en [6] como en [7] se consideran únicamente reutilización espacial. Además los usuarios secundarios solo pueden escanear una sola frecuencia. Como apuntan los autores, el escaneo de todas las frecuencias podría mejorar el rendimiento. En contraste, en este proyecto se usan tanto oportunidades temporales como espaciales además se hace un uso intensivo de todas las frecuencias de la red celular.

La contribución de este proyecto es desarrollar y evaluar un nuevo sistema híbrido de acceso para secundarios combinando acceso sobre oportunidades temporales y sobre oportunidades espaciales. Una mejora respecto al trabajo previo es que en este proyecto está concebido especialmente para redes celulares y considera múltiples transmisores primarios dentro de la estructura celular y múltiples pares secundarios. Se introduce también el nuevo concepto de teselado dual, que caracteriza las oportunidades espaciales en redes celulares con reutilización de frecuencias.

3. ESCENARIO BÁSICO

3.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se evalúa un escenario básico más sencillo que el desarrollado en capítulos posteriores. En este escenario, solo se han tenido en cuenta dos celdas adyacentes y se evalúan las interferencias intra-celda e inter-celda. A diferencia del modelo completo, las transmisiones de los usuarios secundarios serán siempre por hueco temporal, tanto si se realizan en la propia celda como en la adyacente. Esta primera aproximación al sistema sirve para llegar a una serie de conclusiones necesarias para la elaboración del modelo completo del sistema. Estas conclusiones se verifican en las conclusiones finales del proyecto con el modelo del sistema completo.

3.2.- MODELO DEL SISTEMA

3.2.1.- INTRODUCCIÓN

En este modelo básico del sistema, los usuarios secundarios van a poder escanear y transmitir por la banda de bajada de la celda en la que se encuentra y por la de la celda adyacente.

Cuando un SU vaya a tomar la decisión de transmisión, debe elegir entre una de las dos celdas disponibles, y después se dispondrá a escanear los canales de la celda elegida. Para tomar la decisión de por qué celda transmitir, se basa en la distancia a la estación base de la celda adyacente, calculada a partir de la potencia recibida en el canal de control. Si la distancia calculada es mayor que una cierta **distancia de seguridad (SD)**, transmitirá por la banda de la celda contraria (en el caso de que hubiera huecos libres), en caso contrario transmitirá por la celda en la que se encuentra si encuentra canales libres igualmente.

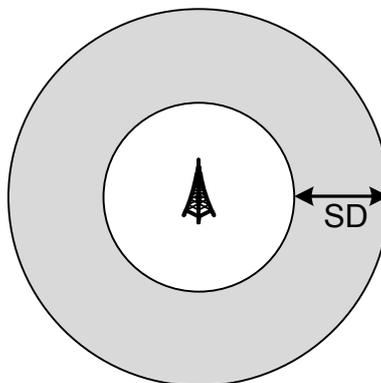


FIGURA 3.1: ESQUEMA DE CELDA CON DISTANCIA DE SEGURIDAD

Por tanto, es necesario calcular tanto la distancia de seguridad como la potencia de transmisión de los SUs de tal forma que no se degraden las comunicaciones primarias de una forma significativa.

En este escenario, se pueden dar algunas situaciones no favorables. Un SU podría detectar a la estación base lo suficientemente alejada, pero podría tener un PU escuchando ese canal muy cerca, lo que supondría una interferencia muy grade. Como se puede ver en la *figura 3.2*, el SU detecta a la Estación Base vecina a una distancia d_2 mucho mayor que la distancia del receptor, d_1 , que es el que realmente sufre la interferencia. Idealmente, lo más favorable es que haya una distancia de seguridad medida a partir de cada PU y que sea específica para la banda que usa ese PU, ya que al usar el canal de bajada no importa el nivel de interferencia en la Estación Base si no en los receptores. Al no ser esto posible, las distancias se toman desde las estaciones base.

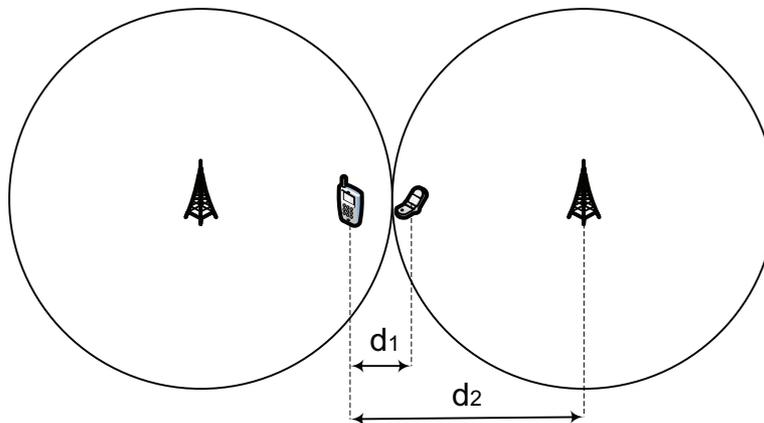


FIGURA 3.2: EJEMPLO DE INTERFERENCIA INTER-CELDA

Un vez que un SU elige una celda para transmitir se dispone a escanear los canales de la misma. En el caso de elegir la celda adyacente, el escaneo en ese caso está sujeto a una mayor probabilidad de error, ya que la potencia recibida de esa celda es menor. Aunque los errores cometidos en el escaneo de la celda contraria con más frecuentes, también son menos graves, ya que la potencia interferente que llega es menor, y por tanto menor la perturbación de la comunicación primaria.

3.2.2.- PROTOCOLO DE LA RED PRIMARIA

La red primaria modela el comportamiento de una red celular. Los PUs que acceden a dicha red, escogen un canal de entre los que quedan libres para realizar sus comunicaciones y cuando finaliza la comunicación abandonan el sistema dejando de nuevo el canal libre.

Viendo el sistema primario en tiempo discreto (mediante ranuras temporales), se puede modelar como un proceso estocástico en tiempo discreto [9], donde en cada slot puede llegar un PU con una probabilidad P_{arrive} . Cada uno de los PUs que se encuentra en el sistema puede abandonarlo en cada slot con una probabilidad $P_{departure}$. Por tanto, modificando estas dos probabilidades se puede modificar el tráfico medio del sistema. Cuando un PU llega al sistema escoge un canal aleatoriamente entre todos los que hay libres y cuando abandona el sistema lo vuelve a dejar libre.

3.2.3.- ESPECTRO EN LA RED SECUNDARIA Y LIMITACIONES HARDWARE

Para poder permitir el acceso y escaneo de los canales de una celda y evitar una mala gestión de los canales y colisiones entre los SUs se divide el total de canales en N bloques de m canales. Esto permite a un SU reserva un bloque dentro de su red ad-hoc para que ningún otro SU de esa red pueda usar los canales de ese bloque. Una vez reservado, se dispondrá a escanear los canales dentro de ese bloque para transmitir por tantos canales como considere.

En la *figura 3.3* se muestra un ejemplo de esta distribución por bloques donde hay tres bloques ($N = 3$) y en cada bloque hay 7 canales ($m = 7$).

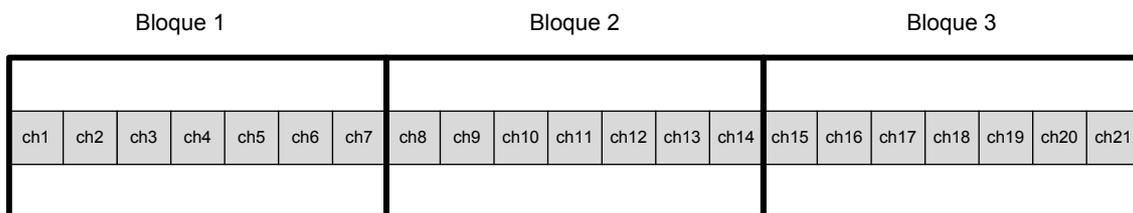


FIGURA 3.3: REPARTO DE CANALES EN BLOQUES

Esta reserva por bloques evita un aumento de señalización asociada a la reserva de canales individuales. Usando la reserva de bloques de canales se asegura que los canales que un SU está escaneando no están siendo usados por ningún otro SU en ese momento y, por tanto, no están siendo explotadas las oportunidades temporales que hay. De esta forma, se limita el número de SUs que acceden al espectro, permitiendo que los SUs que acceden aprovechen las oportunidades espectrales de forma más efectiva.

Para este modelo se considera que los SUs tienen ciertas **limitaciones hardware**. Estas limitaciones son el **número de canales consecutivos que un SU puede escanear (N_{scan})** y el **número de canales primarios por los que un SU puede transmitir de forma simultánea (N_{tx})**. El valor de N_{scan} indica el número de canales que un SU puede escanear, es decir, es una limitación en el ancho de banda de escaneo. La segunda limitación también está relacionada con el ancho de banda del transmisor, ya que el número de canales N_{tx} por los que se puede transmitir de forma simultánea está directamente relacionado con este parámetro.

Además, se ha ajustado el valor de m con el número máximo de canales que un SU puede escanear de tal forma que puede obtener el estado de todos los canales. Si el bloque está mayoritariamente disponible, quedarán algunos canales libres ya que el SU está limitado en cuanto al número de canales que puede usar de forma simultánea. En el caso contrario, si el bloque está casi entero ocupado usará solo los canales que encuentre disponibles aprovechando al máximo la capacidad y, al estar el bloque entero reservado, se evita que otros SUs vuelvan a escanear estos canales ocupados.

3.2.4.- PROTOCOLO DE LA RED SECUNDARIA

El protocolo de los usuarios secundarios está basado en [8], aunque tiene algunas diferencias notables con el mismo.

1. Todos los SUs que quieren transmitir entran en contienda, por lo que calculan un tiempo aleatorio de back-off.
2. El primero que agote su tiempo de back-off gana la contienda y el resto de usuarios volverán a realizar otra contienda en el siguiente slot. En función de la potencia recibida por la estación base calculará por qué celda debe transmitir, y dentro de esa celda elegirá un bloque de los disponibles de forma aleatoria. Si no encuentra ningún bloque disponible vuelve a entrar en contienda.
3. Una vez reservado el bloque, el SU empieza a escanear los canales del mismo y parará, o bien cuando encuentre N_{tx} canales libre, o cuando escanee N_{scan} (todo el bloque). Acto seguido transmitirá por los canales que ha encontrado libres.
4. Continuará transmitiendo por esos mismos canales N_{slots} para después salir del sistema después de transcurrir el número de slots correspondientes a la transmisión.
5. Mientras queden SUs sin bloque asignado se seguirá realizando la contienda (paso 1).

Todos los SUs se comunican por un canal de control que está libre y es común a todos ellos. Por este canal mandan los mensajes de señalización necesarios para poder llevar a cabo la contienda y la reserva de los bloques de canales. Los SUs forman redes ad-hoc por lo que para este escenario se supone que la red ad-hoc de ambas celdas está separada y no interactúan entre ellas. Esto permite que pueda haber interferencias en un canal primario ocasionadas por SUs de ambas celdas de forma simultánea.

3.2.5.- COLISIONES

Las colisiones que se pueden dar en este modelo son debidas a dos posibles causas y son independientes de la celda en la que se encuentren los terminales, es decir, ocurren de igual

forma dentro de una misma celda de comunicaciones, que entre una celda y otra, pero con distinta probabilidad.

3.2.5.1.- COLISIÓN POR FALLO DE ESCANEADO POR PARTE DEL SU

En este caso se supone que un SU está escaneando los canales dentro de su bloque asignado. Se produce un fallo de escaneo, es decir, detectará que un canal ocupado por un PU está libre (falso negativo). Este suceso tendrá mayor o menos probabilidad en función de si se escanea en la celda propia o en la adyacente. El SU comienza a transmitir por un canal que previamente estaba ocupado por un PU por lo que producirá la colisión.

Esta colisión se mantendrá hasta que el SU acabe su periodo de transmisión (N_{slots}) o el PU salga del sistema, que lo hará en cada slot con una probabilidad $P_{departure}$. Por tanto, en este escenario básico no se implementa detección de la colisión, ya que un SU que colisiona no tiene conocimiento de ello. Este mecanismo de detección de colisión se implementa en el escenario completo en capítulos posteriores.

3.2.5.2.- COLISIÓN POR LLEGADA DE UN PU A UN CANAL OCUPADO POR UN SU

En este caso la colisión no se produce por un fallo en el escaneo, sino por la llegada de un nuevo PU al sistema. En este caso, cuando un PU llega al sistema elige aleatoriamente entre uno de los canales disponibles (no usados por otros PU). Este canal elegido podría haber sido escaneado y detectado como libre correctamente por un SU anteriormente, por lo que al llegar el PU se produce la colisión. Al igual que en el caso anterior, la colisión termina cuando uno de los dos participantes cese su transmisión por ese canal. Al igual que en el caso anterior, al no haber mecanismo de detección de colisión las colisiones se prolongan en el tiempo hasta que uno de los dos participantes decida retirarse. Esto implica una mayor gravedad de las colisiones en comparación con el caso en el que se implementen mecanismos de detección de colisión.

3.2.6.- MODELO DE CANAL DE COMUNICACIONES

El modelo de canal de comunicaciones es el **piecewise dual-slope**, que es un caso particular del modelo piecewise lineal (multi-slope) [10], y es caracterizado porque consta solo de dos pendientes de atenuación: una dentro del radio operativo del transmisor (ya sea primario o secundario), y otra pendiente de atenuación (mayor que la primera) fuera del rango del mismo. Este modelo se ajusta a partir de medidas empíricas y se aborda con más detalle en la sección 5.2, dentro del capítulo donde se describen los detalles de la evaluación numérica del sistema completo.

3.2.7.- DISTRIBUCIÓN DE POTENCIAS

La distribución de potencias es un tema clave a la hora de obtener resultados en este modelo. El criterio de reparto asume que la estación base tiene una potencia total de transmisión. Esta potencia total la reparte entre todos los PUs que hagan uso del sistema. Por tanto, si hay un solo PU en un determinado momento, la Estación Base le transmite con toda la potencia disponible, aumentando su calidad de servicio, mejorando su SINR y por tanto haciéndolo más inmune a interferencias. En caso contrario, cuando hay varios PUs haciendo uso de la estación base, la potencia total se reparte entre todos de forma que, cuantos más PUs haya en la celda, más vulnerables a interferencias serán y tendrán peor calidad de servicio.

Ocurre algo análogo con los SUs. Cada SU tiene una potencia de transmisión disponible que reparte entre todos los canales por los que transmite. Cuantos más canales use para transmitir, más se reparte la potencia, y por tanto menor será la potencia transmitida en cada canal y viceversa.

Este reparto de potencias tiene una fuerte repercusión sobre la interferencia de los SU a los PUs que depende del tráfico primario. Cuando hay poco tráfico primario, la potencia de la estación base se dirige a pocos PUs, por lo que tienen gran potencia de señal. Por otro lado los SUs encuentran muchos canales libre, por lo que transmiten por varios a canales a la vez, repartiendo las potencias de forma que no llega mucha potencia interferente a los PUs. Esta situación favorece a los PUs.

En el caso de un alto tráfico primario ocurre lo contrario. La estación base reparte las potencias entre todos los PUs (llega menos señal útil a cada uno de ellos). Por otro lado, los SUs encuentran menos canales libres, lo que hace que concentren toda su potencia en unos pocos canales que causan más interferencia en los PUs. Este caso es muy desfavorable para los PUs ya que disminuye su señal útil y aumenta su la potencia interferente.

3.3.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.3.1.- INTRODUCCIÓN

En este apartado se muestran y analizan los resultados obtenidos por evaluación numérica del modelo detallado anteriormente. En primer lugar se compraran los diferentes parámetros medidos en la red en función de la Distancia de Seguridad. Después, añade al modelo una variación de la probabilidad de fallo en el escaneo en función de si se escanea en la celda propia o en la adyacente. Esto dota al modelo de más realismo, ya que no se puede escanear con la misma precisión porque las potencias recibidas de la celda adyacente son mucho

menores. Por último se compara el escenario con doble celda, cogiendo la Distancia de Seguridad óptima para el SU, con el escenario con una celda y se analizan los resultados.

Es importante destacar que para realizar estas simulaciones se han considerado celdas cuadradas. Estas celdas son una simplificación geométrica de las celdas circulares (o hexagonales) que facilitan el modelado del sistema en el simulador y con las que se pueden obtener resultados válidos para celdas circulares.

A continuación se definen los parámetros más relevantes del simulador y se muestran sus valores:

Parámetro	Valor asignado
Número de bloques totales, N	4 (2 por celda)
Número de canales por bloque, m	7
Número máximo de canales consecutivos que puede escanear un SU, N_{scan}	7
Número máximo de canales que puede usar un SU de forma simultánea, N_{tx}	4

De estos parámetros se extrae que cada celda tiene dos bloques de canales disponibles. Cuando un SU escoge una celda, tendrá que elegir uno de esos dos bloques (en el caso de que se encuentren libres). Acto seguido, empieza a escanear los canales del bloque parando cuando haya escaneado todos los canales (ya que $N_{scan} = m$) y o cuando haya encontrado N_{tx} canales libres. Transmitirá por todos los canales libres encontrados que serán como máximo N_{tx} .

En la *figura 3.4* se puede apreciar el modelo de celdas cuadradas, la distancia de seguridad definida para ambas celdas y por qué celda transmite cada SU en función de su posición.

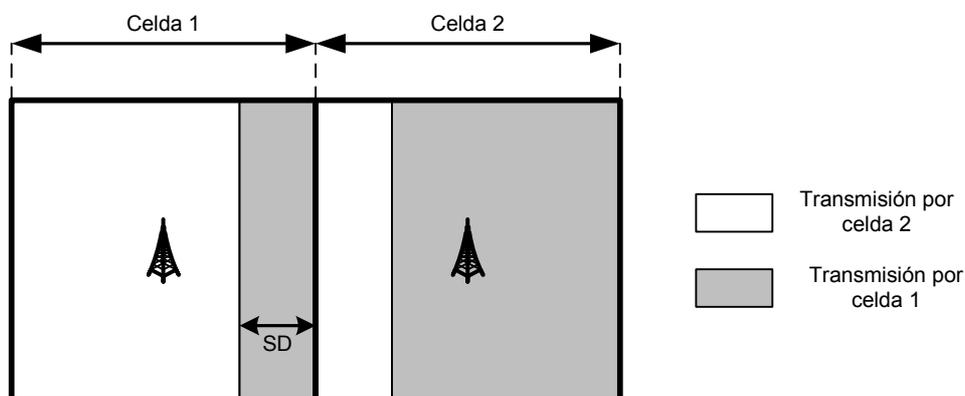


FIGURA 3.4: ESQUEMA DEL MODELO CON CELDAS CUADRADAS

3.3.2.- ESCENARIO BÁSICO 1

En este escenario se estudia la variación de diferentes parámetros con la Distancia de Seguridad (SD). Se considera que la probabilidad de fallo en el escaneo es la misma escaneando en la propia celda y en la adyacente. Esto se modificará en escenarios posteriores.

Como se puede ver en la *figura 3.5*, el número medio de transmisiones correctas por parte de los SUs varía en primer lugar con el tráfico primario. Cuanto más tráfico hay, menor es la probabilidad de encontrar un canal libre, y cuando se encuentra un canal libre, mayor es la probabilidad de que haya colisión y falle la transmisión. Por tanto, en media habrá menos transmisiones. En segundo lugar se aprecia una variación del número de transmisiones correctas con la distancia de seguridad.

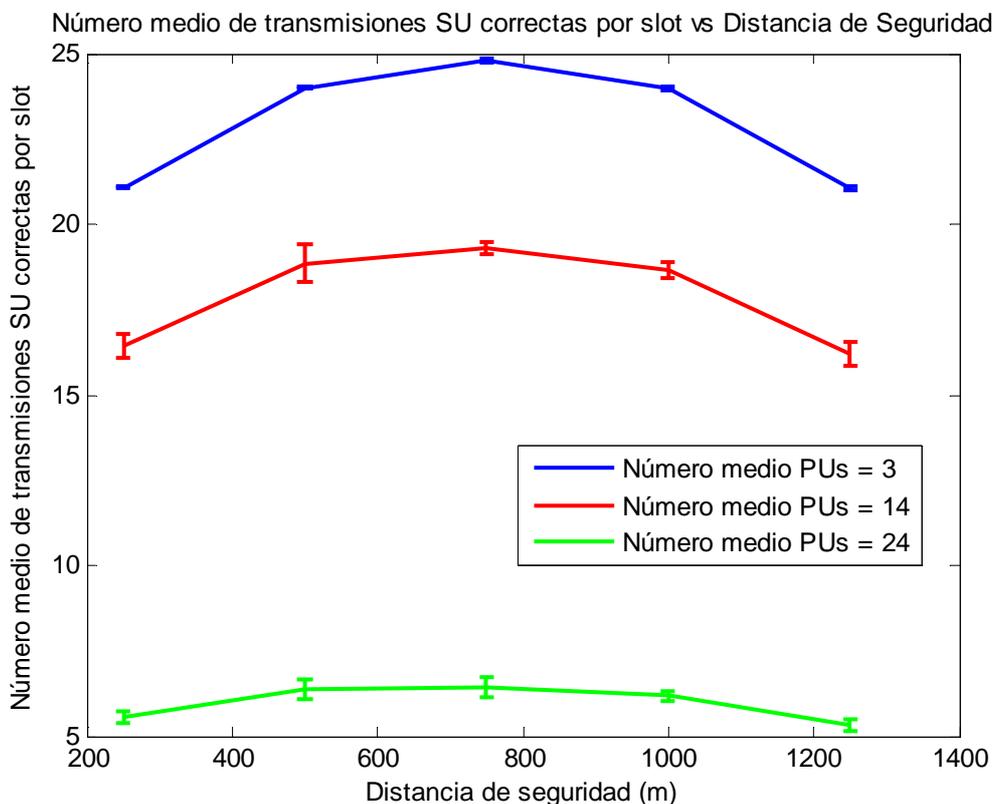


FIGURA 3.5: NÚMERO DE TRANSMISIONES CORRECTAS VS SD

Esta variación con SD es debida al reparto espectral en el terreno. Si se escoge una distancia de seguridad pequeña, solo podrán transmitir por la celda propia los SUs que se encuentren en un área muy pequeña de terreno. La probabilidad de que haya SUs en esa área de terreno será pequeña y por tanto, pequeña la probabilidad de que se ocupen esos bloques de canales.

Por ejemplo, en la *figura 3.6 (a)* es mucho más probable que un SU esté en la zona blanca que en la zona gris. En la *figura 3.6 (b)* ocurre lo contrario. Hay la misma probabilidad de que un SU esté en cualquiera de las dos zonas.

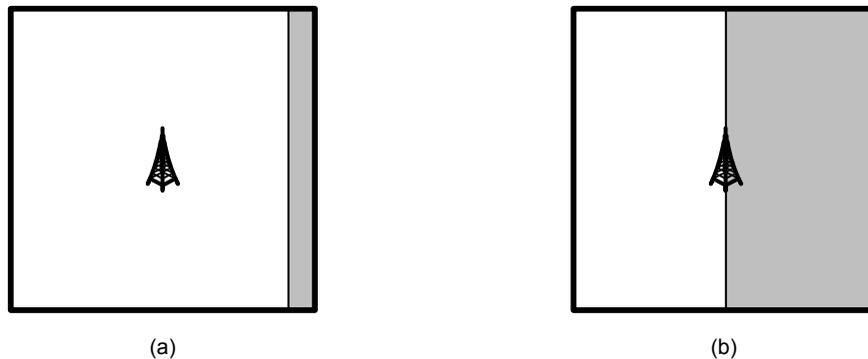


FIGURA 3.6: EJEMPLO DE VARIACIÓN DE SD

Luego la distancia de **seguridad óptima para los SUs** es una distancia que maximice la utilización de todos los bloques de espectro; esta distancia es justo **la mitad de la celda**. Cogiendo como SD la mitad de la celda, hay la misma probabilidad de que un SU esté en una posición tal que tenga que transmitir por la celda en la que se encuentra o por la celda adyacente. Por tanto, para ese valor de SD se **maximiza la utilización del espectro para los SUs**.

En la *figura 3.7* se observa la probabilidad de colisión (entre un PU y un SU) en función de la SD. Se puede ver que las curvas tienen la misma forma que en la *figura 3.5*. Esto es lógico ya que, a mayor tráfico de usuarios secundarios, mayor será la probabilidad de colisión. Por otro lado, también se observa que la probabilidad de colisión crece con el aumento del tráfico primario. También es destacable ver los valores del eje de ordenadas. Se observa que los valores de la probabilidad de colisión son muy bajos. Esto es debido a que el simulador está configurado de una forma en la que las colisiones no son algo muy frecuente. Este hecho afectará otros parámetros medidos.

En la *figura 3.8* se representa la probabilidad de transmisión correcta en los PUs en función de la SD. Se puede ver cómo depende mayoritariamente del tráfico primario, y hay una pequeña variación con la distancia de seguridad. Esta dependencia con el tráfico se explica en el apartado de reparto de potencias. La variación que sufre la probabilidad de transmisión correcta con la distancia de seguridad solo se aprecia ligeramente. Esto es debido a que la probabilidad de colisión es tan reducida que los fallos de transmisión por colisión no tienen un gran impacto en la curva final.

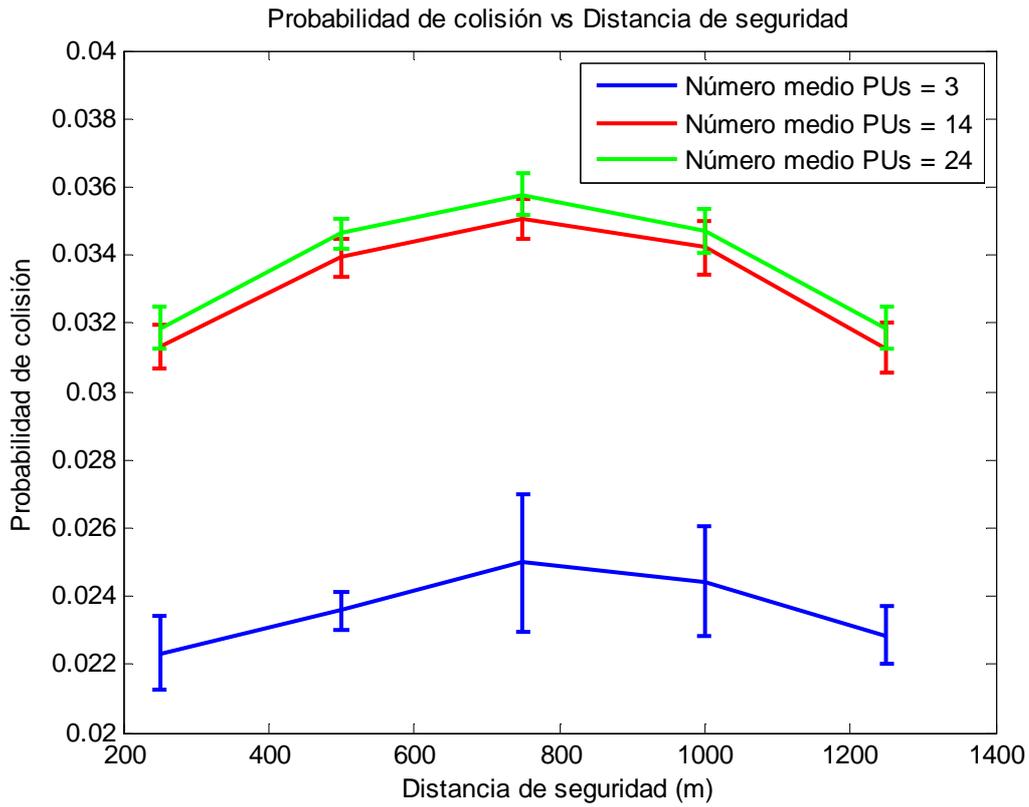


FIGURA 3.7: PROBABILIDAD DE COLISIÓN VS SD

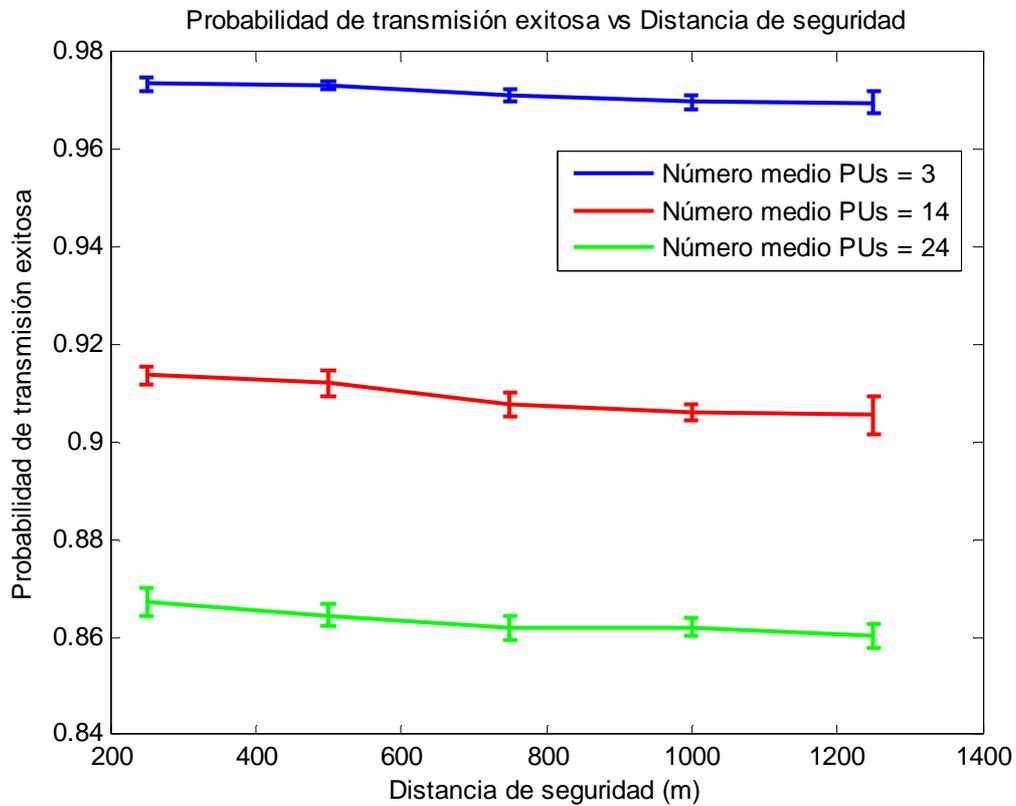


FIGURA 3.8: PROBABILIDAD DE TRANSMISIÓN CORRECTA VS SD

Aunque la variación es ligera, se aprecia una tendencia decreciente con el aumento de SD. Esto se puede apreciar fácilmente observando la *figura 3.9*, donde se sombrea la parte de la celda donde los SUs transmiten por la celda en la que se encuentran. A mayor distancia de seguridad, mayor es la parte sombreada.

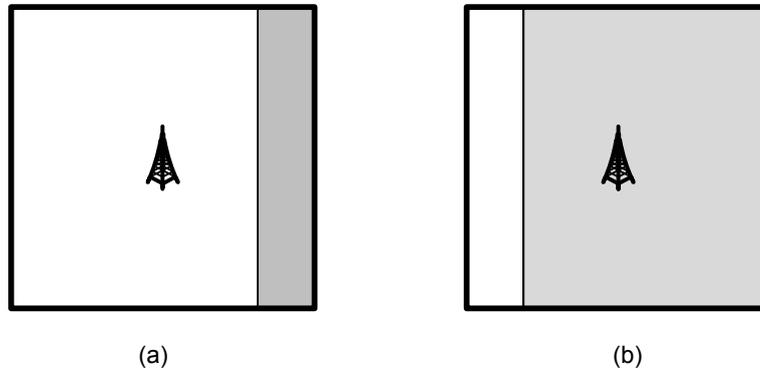


FIGURA 3.9: ESQUEMA INFLUENCIA DE SD SOBRE EL TRÁFICO PRIMARIO

Por tanto, se puede observar en *figura 3.9 (a)* que la zona sombreada es mucho menor que en la *figura 3.9 (b)* debido a que es menor la SD. Como los SUs de la parte sombrada transmiten por la celda en la que se encuentran, los PUs de esa celda reciben mayor interferencia de estos SUs (más cercana). Por tanto, en este escenario a los PUs les favorece que la distancia de seguridad sea lo más pequeña posible incluso llegando al extremo de que sea cero, donde solo le llegarían interferencias de celdas adyacentes, y por tanto serían de menor intensidad.

Esta conclusión se puede corroborar con la *figura 3.10* donde se ha medido el mismo parámetro pero esta vez realizando una reasignación de canales de los PUs en cada slot. Esto quiere decir que al principio de cada slot todos los PUs van a cambiar el canal que están utilizando de forma aleatoria. Este escenario extremo propicia que se produzcan muchas colisiones y, por tanto, estas tengan más impacto en la probabilidad de transmisión correcta.

Como se puede observar en la *figura 3.10*, al haber muchas colisiones, se convierten en un suceso significativo con gran impacto en el parámetro a medir. Por tanto, la probabilidad de transmisión correcta disminuye con el aumento de la SD.

En conclusión, **es favorable para los PUs que la distancia de seguridad sea lo más cercana a cero posible**. Otra forma de probar este hecho es mediante el **análisis del caso peor**. Lo que se hace en este escenario es encontrar la distancia que minimiza las máximas atenuaciones medidas en función de r_{PU} (distancia del SU al centro de la celda).

$$d_{opt} = \min_d \left[\max_{r_{PU}} (I_1(r_{PU}) + I_2(r_{PU})) \right]$$

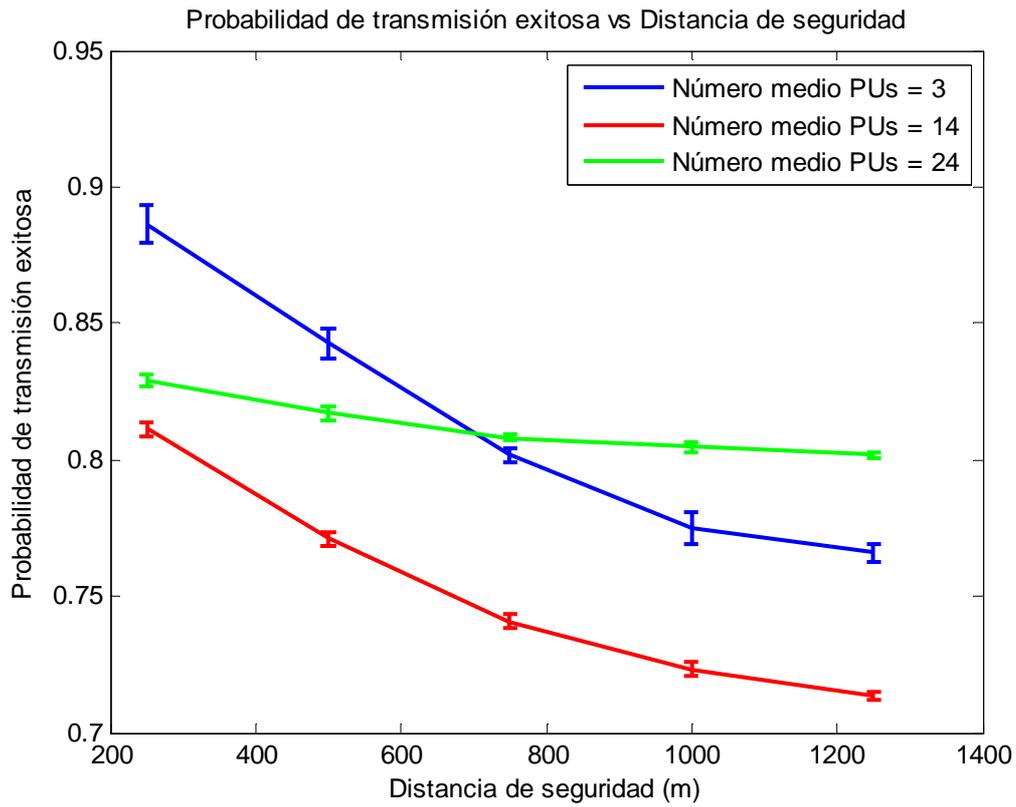


FIGURA 3.10: PROBABILIDAD DE TRANSMISIÓN CORRECTA VS SD (REASIGNACIÓN DE CANALES)

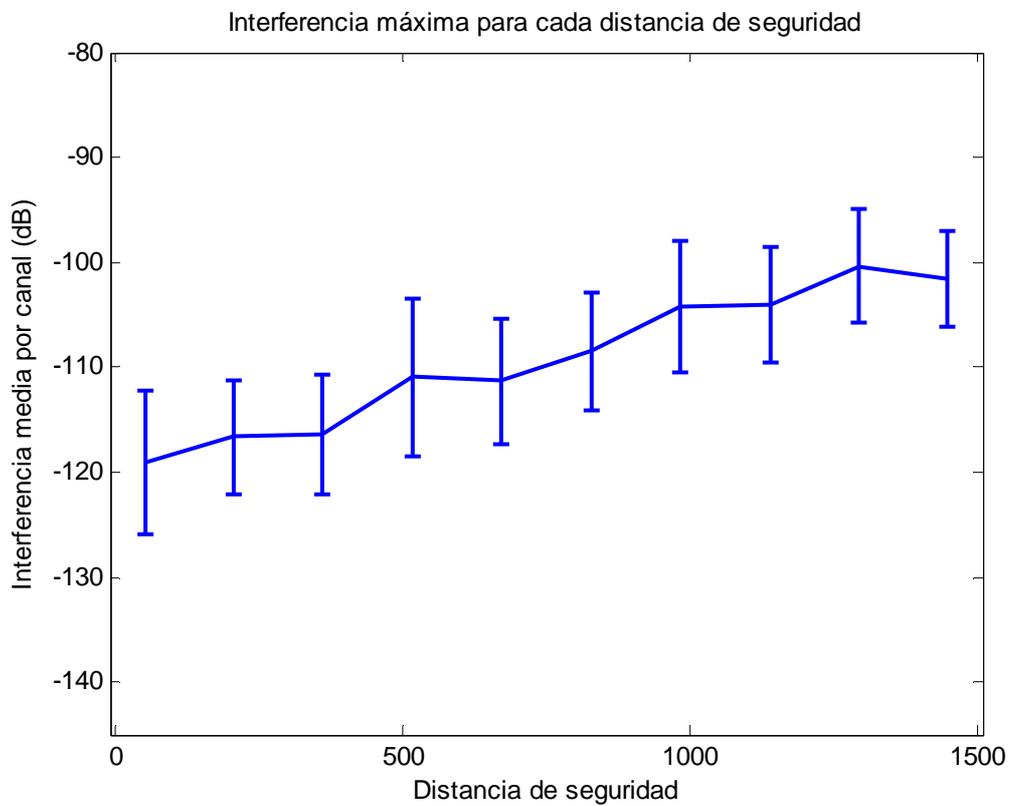


FIGURA 3.11: ANÁLISIS DEL PEOR CASO

Como se puede ver en la *figura 3.11*, el valor de SD que minimiza la interferencia en el peor caso, es el valor más pequeño de la distancia de seguridad.

De acuerdo con lo anterior, en la *figura 3.12* se muestra la probabilidad de transmisión correcta de los PUs dado que hay colisión en función de SD. Estas curvas indican la gravedad de las colisiones. Se puede ver cómo cuanto menor es la SD las colisiones son menos graves, es decir, hay menos probabilidad de que una colisión provoque pérdida de paquete. Cuando más se acerque a cero SD, las colisiones vienen en mayor proporción de la celda adyacente, y por tanto serán menos graves, o dicho de otra forma, producirán pérdida de paquete con menor probabilidad.

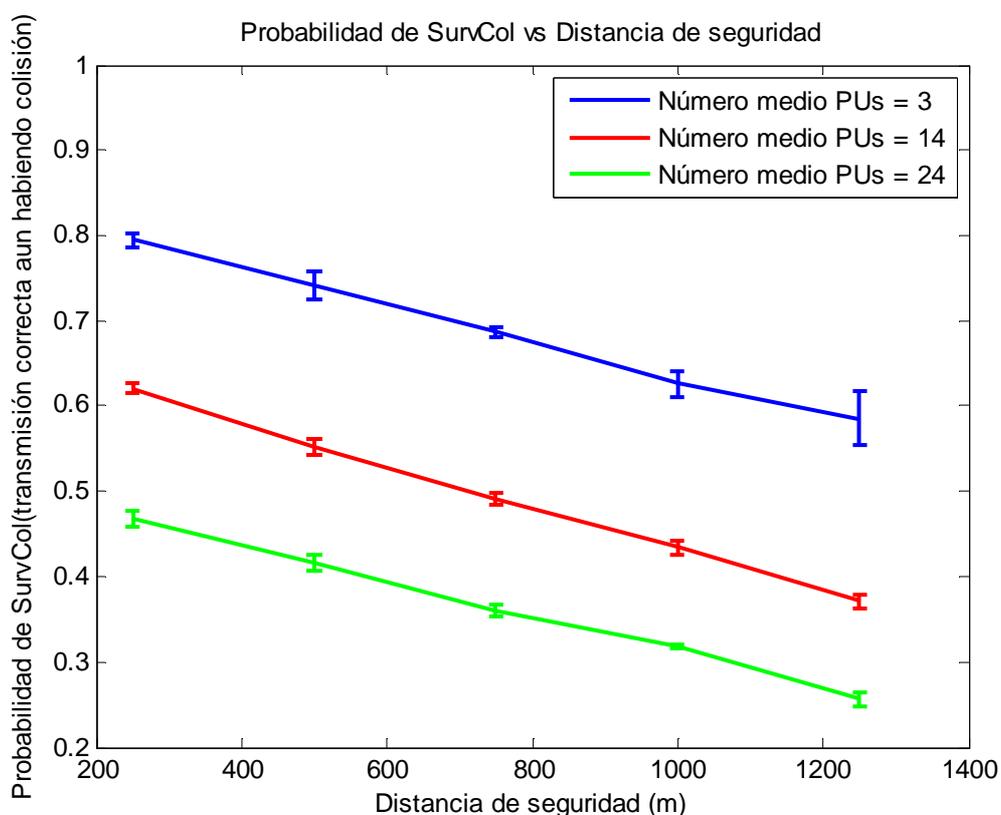


FIGURA 3.12: PROBABILIDAD DE TRANSMISIÓN CORRECTA DADO QUE HAY COLISIÓN VS SD

3.3.3.- ESCENARIO BÁSICO 2

Este escenario se diferencia del anterior en que se tienen en cuenta diferentes probabilidades de fallo al escanear para diferentes celdas. Es necesario introducir este cambio en el modelo ya que un SU no recibe la misma potencia de la estación base de la celda en la que se encuentra que de otra estación base de una celda adyacente. Por tanto, no podrá escanear con la misma precisión los canales de estas dos celdas y será más probable que falle al

escanear la celda adyacente. Concretamente, en este escenario la probabilidad de falso negativo en la celda adyacente es cuatro veces la de la celda propia.

Una de las grandes diferencias con el escenario anterior es la probabilidad de colisión. Como se puede ver en la *figura 3.13*, en este caso no varía de forma análoga al número medio de transmisiones correctas de los SUs (*figura 3.7*). En este escenario, la probabilidad de colisión disminuye al aumentar la SD. Esto es fácil de entender sabiendo que cuanto mayor es SD, más usuarios transmiten por la celda propia y menos por la adyacente. Por tanto, cuanto mayor sea SD, habrá menos colisiones debido a que habrá más SUs transmitiendo por la celda en la que se encuentran, es decir, escaneando el espectro con más precisión.

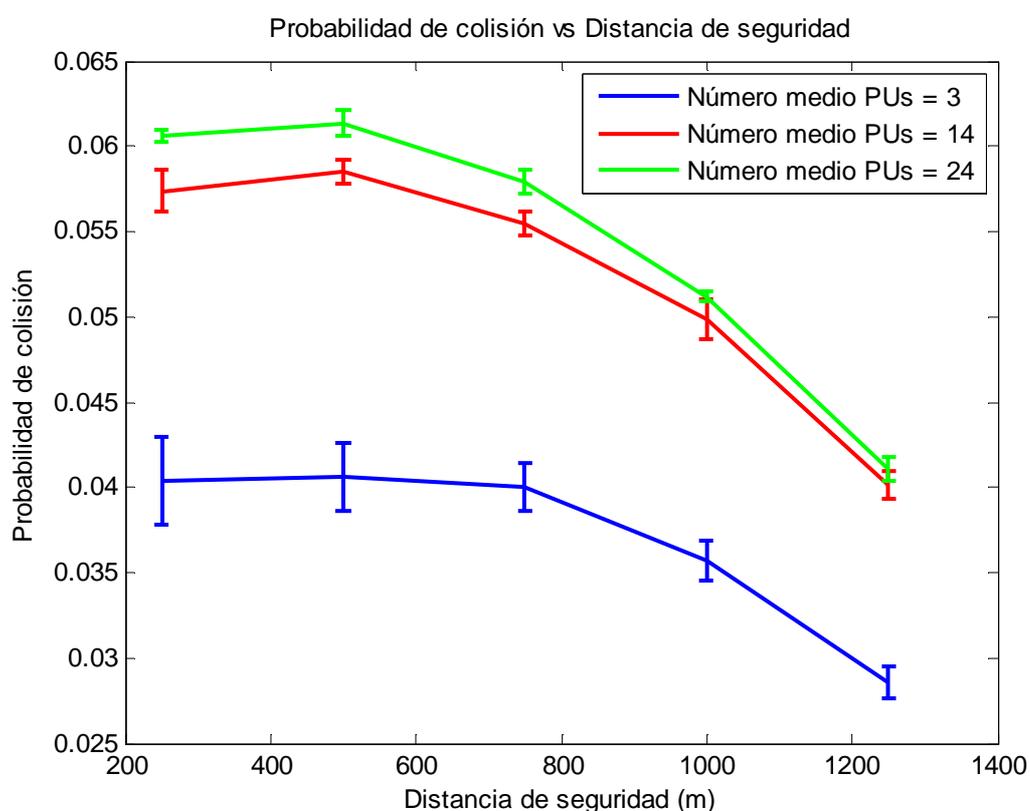


FIGURA 3.13: PROBABILIDAD DE COLISIÓN VS SD (ESCENARIO BÁSICO 2)

Es importante destacar de este escenario la probabilidad de transmisión correcta por parte de los PUs (*figura 3.14*). En este caso no se aprecia una disminución de esta probabilidad con la distancia de seguridad como en el escenario anterior, sino que ahora es más plana debido a que en la situación que antes era más favorable (distancias de seguridad bajas), ahora se producen más colisiones que empeoran el rendimiento.

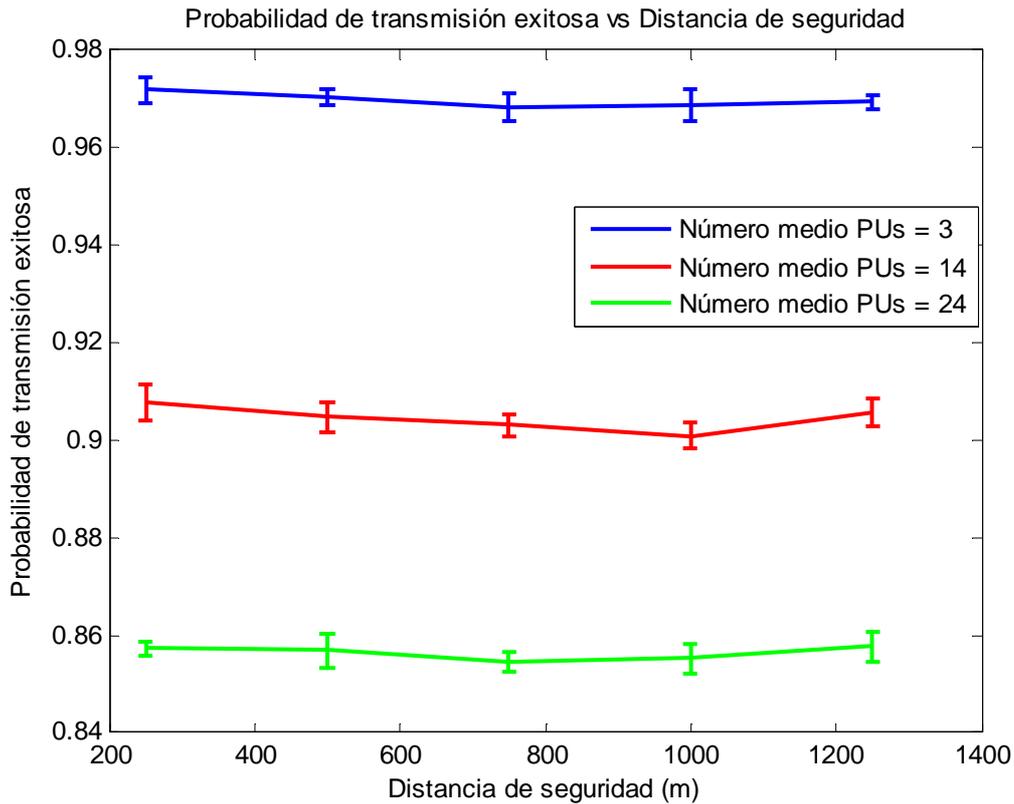


FIGURA 3.14: PROBABILIDAD DE TRANSMISIÓN CORRECTA VS SD

3.3.4.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se van a comparar los resultados obtenidos anteriormente, en los que los SUs tienen oportunidad de usar la celda adyacente, con simulaciones del protocolo realizadas en una sola celda. Dentro del modelo en el que se usa la celda adyacente, se distinguen dos casos. En el primero hay la misma probabilidad de fallo en el escaneo tanto en una celda como en otra. En el segundo la probabilidad de falso negativo en la celda adyacente es cuatro veces la probabilidad de falso negativo en la celda propia. Además, es importante destacar que la Distancia de Seguridad escogida para los casos en que usan dos celdas es la mitad de la longitud de la celda. Esta distancia es óptima la capacidad de los SUs.

Así, en este apartado se estudia el **impacto** tanto de **usar espectros de celdas adyacentes**, como de **variar la probabilidad de fallo escaneando** en el rendimiento del sistema.

En la *figura 3.15*, se muestra la probabilidad de colisión en los diferentes sistemas. Se puede ver cómo en el caso en el que hay dos celdas la probabilidad de colisión aumenta considerablemente. Esto es debido a que hay el doble de SUs usando la misma banda y por tanto habrá un aumento de colisiones.

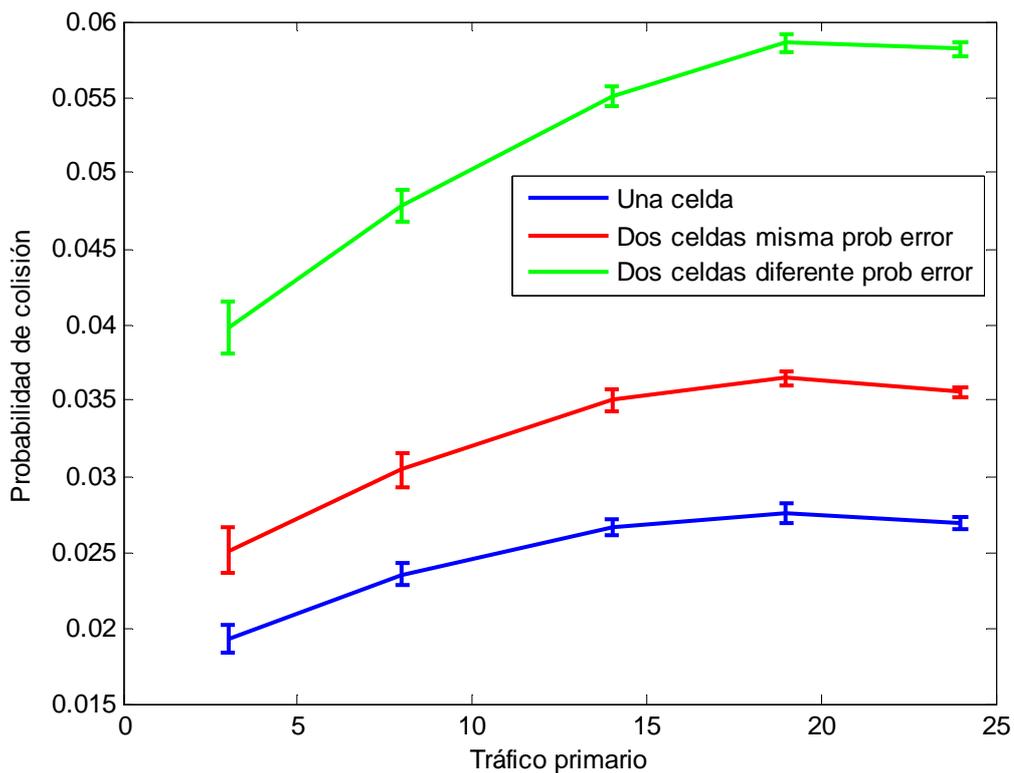


FIGURA 3.15: PROBABILIDAD DE COLISIÓN DIFERENTES ESCENARIOS VS TRÁFICO PRIMARIO

En el caso en el que se varía probabilidad de error escaneando la celda adyacente (curva verde), se obtiene una curva con un valor superior a de las dos anteriores. En este caso, además de haber el doble de SUs transmitiendo que en el caso de una sola celda, los SUs que transmiten por la celda adyacente (la mitad del total) tienen una probabilidad de fallar escaneando cuatro veces la probabilidad establecida dentro de una celda. Por último, resulta intuitivo el aumento de todas las curvas con el tráfico primario. Cuanto más tráfico primario hay en la red, más probabilidad hay de colisionar.

En la *figura 3.16* se muestra la probabilidad transmisión correcta dado que hay colisión. O dicho de otra forma, la probabilidad de que una colisión no sea grave y por tanto no haya pérdida de paquete. Cuando ocurre esto, ha habido una disminución de la SINR pero no suficientemente significativa como para que el receptor no sea capaz de poder obtener la información enviada correctamente.

Con esta figura se complementa la información dada en la figura anterior, ya que además de saber la probabilidad de colisión es importante obtener la probabilidad de que esa colisión produzca pérdida de paquete.

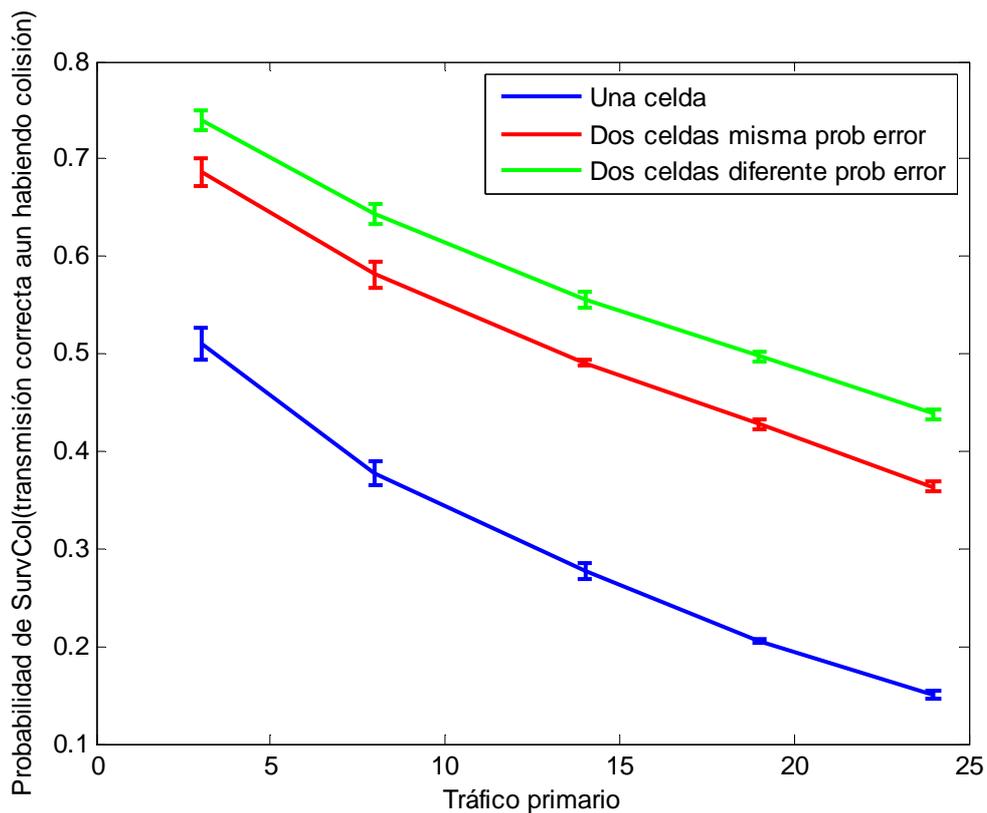


FIGURA 3.16: PROBABILIDAD DE QUE UNA COLISIÓN NO SE GRAVE VS TRÁFICO PRIMARIO

Se puede ver en la *figura 3.16* cómo en los escenarios que más colisiones se producen, menos graves son las mismas y por tanto menor es la probabilidad de que produzcan pérdida de paquete. Es lógico pensar esto ya que, por ejemplo, en el escenario donde más colisiones se producen (dos celdas y mayor probabilidad de fallo de escaneo), vienen muchas más colisiones de la celda adyacente. Estas colisiones no son tan graves ya que los SUs que interfieren están separados una distancia siempre mayor que SD de los PUs interferidos. Por tanto, la información de las colisiones no es un dato del todo concluyente. Por ello, a continuación se estudian los resultados medidos de la probabilidad de transmisión correcta.

En la *figura 3.17* se compara la probabilidad de transmisión correcta de los PUs para las diferentes configuraciones y en función del tráfico PU. Sabiendo cómo funciona el reparto de potencias, es fácil ver por qué este parámetro disminuye con el aumento del tráfico. Cuanto más tráfico PU más se reparte la potencia disponible en la estación base y, por otro lado, menos canales encuentra disponibles el SU, por lo que transmite con más potencia por ellos. Por tanto, menos potencia útil y más interferencia.

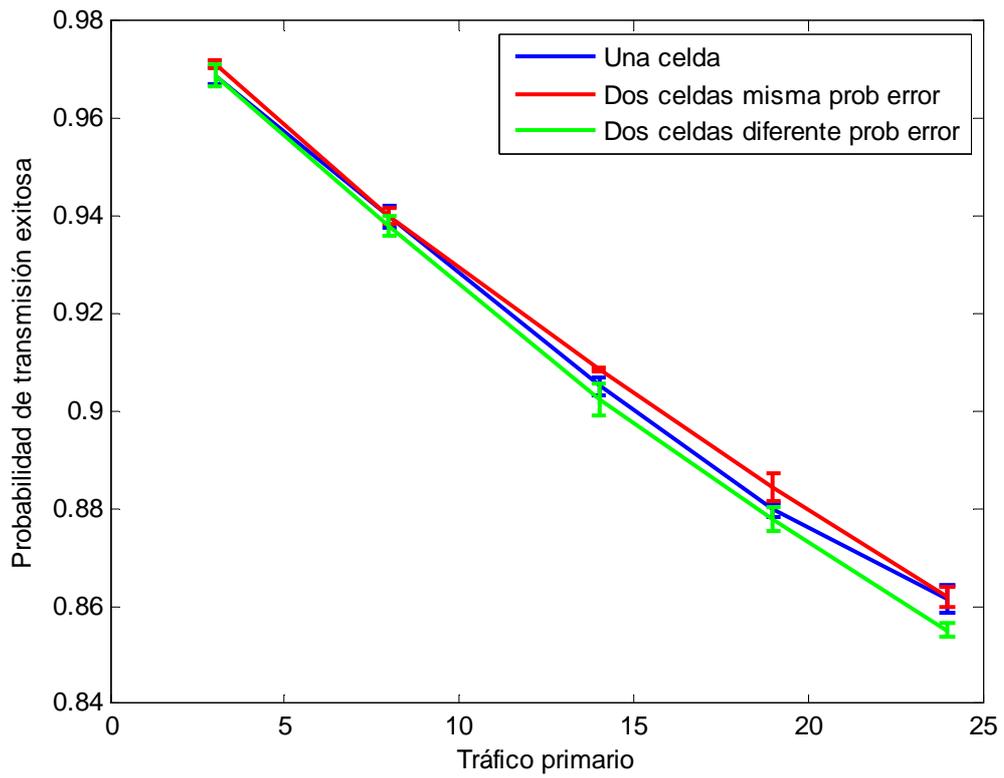


FIGURA 3.17: COMPARACIÓN TRANSMISIÓN CORRECTA PARA VARIAS CONFIGURACIONES

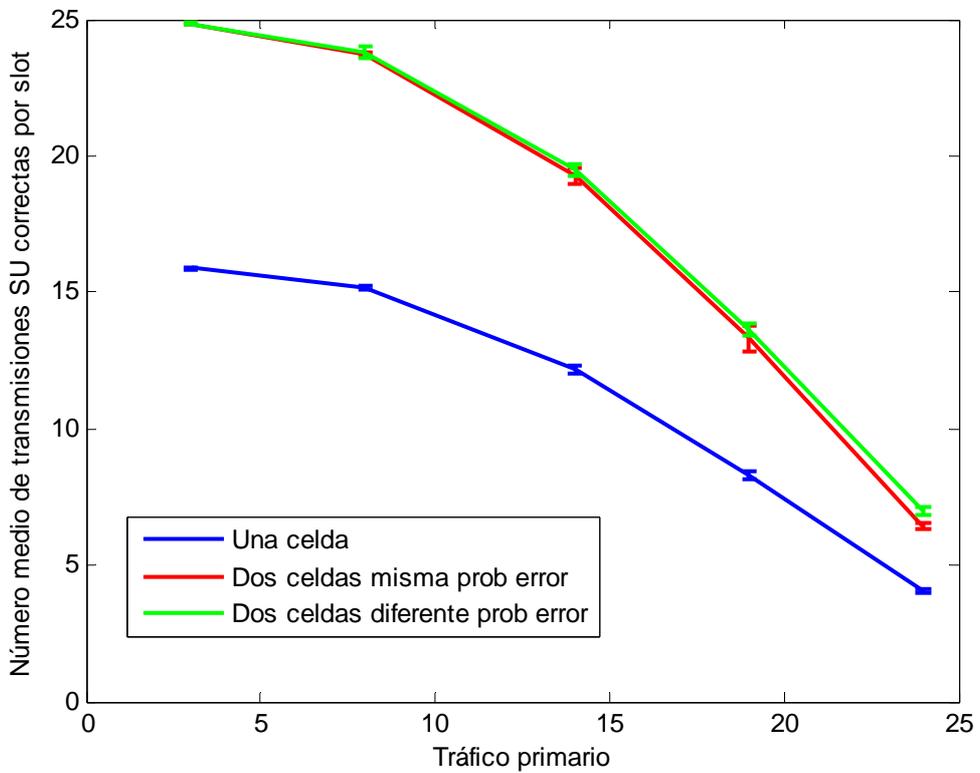


FIGURA 3.18: NÚMERO MEDIO DE TRANSMISIONES SU VS TRÁFICO PRIMARIO

Resulta destacable comparar las tres curvas que representan los diferentes sistemas. Se puede ver cómo la curva que representa **dos celdas con la misma probabilidad de fallo en escaneo** tiene una **mayor probabilidad transmisión correcta** a pesar de tener el doble de SUs transmitiendo por su banda. Esto es debido a que la mitad de estos SUs que transmiten por su banda se encuentran solo en la mitad del área de la celda, y la otra mitad se encuentran más alejados en la celda adyacente, de forma que sus **interferencias son de menor intensidad**.

El otro caso que se contempla es cuando la **probabilidad de error escaneando la celda adyacente es cuatro veces la probabilidad de error escaneando la propia**. En este caso la **probabilidad de transmisión correcta es ligeramente menor** que cuando hay una sola celda. Esto es debido a que, aunque es un escenario muy similar al anterior, se producen muchas más colisiones debidas a fallos en el escaneo que propician un aumento de fallos en las transmisiones primarias.

Una vez analizado la influencia de los diferentes escenarios sobre la probabilidad de transmisión correcta en los PUs, se estudia qué ocurre con el rendimiento de los SUs.

Se puede ver claramente como el rendimiento de los SUs es claramente superior cuando se usan dos celdas. Esto es debido a que hay el doble de SUs transmitiendo en la misma red ad-hoc (en el mismo área). La mitad de ellos transmite por la celda en la que se encuentra, y la otra mitad por la celda adyacente. Por tanto, la estrategia de usar dos celdas es claramente beneficiosa para los SUs que consiguen aumentar de forma clara el número medio de transmisiones por slot. La desventaja es que los PUs pueden sufrir una pequeña degradación de su probabilidad de transmisión correcta. Esta degradación no es tan significativa como el aumento de capacidad de los SUs, que aumenta a casi el doble.

3.4.- CONCLUSIONES

En primer lugar se ha analizado la variación de los parámetros con relación a la Distancia de Seguridad. Se llega a la conclusión de que **para los SUs la distancia óptima es la mitad de la dimensión de la celda**, donde se maximiza la probabilidad de que los SUs ocupen al máximo el espectro. Por otro lado, **para los PUs la Distancia de Seguridad óptima es cero**. La interpretación de esto es que les favorece siempre que las interferencias vengan de la celda adyacente ya que en ese caso son de menor intensidad y afectan menos a las comunicaciones.

A continuación se ha estudiado qué impacto tiene **usar el protocolo en dos celdas** respecto a usarlo en solo una. La conclusión que se extrae es que para los SUs es claramente beneficioso

usar dos celdas, ya que puede haber el doble de SUs en la misma red ad-hoc, lo que implica un **claro aumento de la capacidad del sistema secundario**. Para los PUs, teniendo en cuenta diferentes fallos en el escaneo, supone una **pequeña degradación de las comunicaciones** disminuyendo su probabilidad de transmisión correcta.

Con este primer escenario básico se han obtenido unos resultados que claramente benefician al sistema secundario ya que, el hecho de usar las bandas de dos celdas, aumenta mucho su capacidad. Por otro lado, este aumento de capacidad puede ser perjudicial para los usuarios primarios. Extrapolando este modelo a una red celular completa surge la idea de crear una división del espacio o teselado para los usuarios secundarios de tal forma que, un usuario que se encuentra en una celda secundaria o dual, se le asegure que al transmitir por una frecuencia f_i , se encuentra más alejado de esa frecuencia f_i que de cualquier otra. De esta forma obtienen beneficios los usuarios primarios que, como se ha podido ver en este escenario básico, les conviene que las interferencias vengan de cuanto más lejos mejor.

Así, en los capítulos posteriores se desarrolla y evalúa este sistema con doble teselado (primario y secundario) y se obtienen resultados que indican cómo debe ser el reparto de secundarios en cada tipo de celda para maximizar su capacidad teniendo la interferencia primaria dentro de unos límites.

4.- ACCESO HÍBRIDO A REDES

CELULARES. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

4.1.- INTRODUCCIÓN

El sistema que se plantea consta de dos redes overlay: la red primaria y la red secundaria. La red primaria es la red celular preexistente, la cual suele estar infrautilizada. Por otro lado, la red secundaria es una red ad-hoc donde los SUs establecen conexiones punto a punto entre ellos. Normalmente estas conexiones punto a punto no suelen ser muy distantes como se menciona más adelante y suelen tener un carácter finito en el tiempo.

La red primaria contiene estaciones base y terminales, también llamados PUs. Cada estación base provee cobertura a una cierta área geográfica adyacente. Esta área se denomina celda primaria. Cada estación base usa una frecuencia diferente a las celdas que están a su alrededor. Esto divide el área en celdas con diferentes frecuencias lo que incrementa la capacidad de la red de acceso. El número de frecuencias diferentes usadas está relacionado con otro parámetro llamado *factor de reutilización*. Este es un parámetro fundamental en el diseño de la red celular y, junto con las potencias transmitidas de las estaciones base, nos sirve para estimar la interferencia co-canal que sufren los terminales de una determinada celda.

En el presente trabajo se consideran celdas hexagonales y un esquema de 7 frecuencias. Por tanto, las 6 celdas adyacentes a cualquier celda tendrán frecuencias diferentes a la misma, disminuyendo las interferencias inter-celda y aumentando la capacidad.

Aunque en este trabajo se ha considerado el uso de 7 bandas de frecuencias distintas, este framework o método de reutilización de espectro es aplicable para cualquier factor de reutilización usado en redes celulares.

Cada banda frecuencial está dividida en $2N$ canales ortogonales (N para el downlink y N para el uplink). Aunque se han considerado tanto el downlink como el uplink, solo es posible usar el downlink debido a que el uplink recibe interferencias extremadamente altas. Esto ocurre porque la estación base se suele encontrar en lugares específicos (normalmente altos), tales que proporcione cobertura a un área extensa. De esta forma, la señal entre la estación base y otro terminal (o viceversa) no se atenúa tan rápido como entre terminales que no están en una posición tan privilegiada. Por ellos, al sufrir poca atenuación la señal y la estación base, señal

llega con mucha potencia causando una interferencia importante. Así, el uso de uplink es impracticable.

El tiempo está dividido en time-slots. Se le llama *paquete* a los datos transmitidos a un PU dentro de un time-slot.

A continuación se detallan las dos estrategias de acceso al espectro de los SU, acceso temporal y acceso espacial, y por último se describe el acceso híbrido o combinado.

4.2.- TIPOS DE ACCESO SECUNDARIO

4.2.1.- ACCESO SECUNDARIO EN OPORTUNIDADES TEMPORALES

Se considera la celda primaria i , que usa la banda de frecuencia f_i y que tiene N canales de uplink y N canales de downlink. Dependiendo de la cantidad de tráfico PU, algunos canales estarán libres de transmisiones PU en algunos periodos de tiempo concretos. Se denomina ***oportunidad temporal*** a un periodo libre de actividad PU en un canal dado. Un transmisor secundario que está en la celda i puede hacer uso de una o más oportunidades temporales de f_i para realizar una transmisión secundaria sobre esos canales. Además, se tiene en cuenta que, al ser los PUs y los SUs de diferente tecnología, el ancho de banda de los canales no tiene por qué coincidir. Por ello, se considera que un SU usa m canales PU de forma simultánea como un único canal SU.

Esta estrategia de reutilización del espectro consta de dos fases: escaneo y transmisión. La fase de escaneo permite a la pareja de secundarios (transmisor y receptor) detectar la actividad PU y encontrar oportunidades temporales en los canales de la banda de frecuencia f_i . Cuando se detectan m o más canales libres, la pareja cognitiva comienza la fase de transmisión sobre esos canales. Si durante la fase de transmisión se detecta actividad PU en alguno de los canales ocupados, la transmisión SU se interrumpe para no interferir en la transmisión primaria. La capacidad de realizar una detección adecuada de la actividad PU sobre los canales usados de forma adecuada, se modela con una probabilidad menor a la probabilidad de detección correcta en la fase de escaneo.

Esta detección realizada durante la transmisión SU puede hacerse de varias maneras. La más extendida consiste en apagar la transmisión durante un corto periodo de tiempo y escuchar el canal [2]. También se puede realizar considerando que el receptor SU puede detectar transmisiones solapadas en cada canal por medio de un estimador de máximo a posteriori (estimador MAP) [3]. Es importante destacar que, mientras que el mecanismo de detección de colisión se pone en marcha, pueden transcurrir unos pocos time-slots, lo que se traduce en

algunos time-slots de colisión debido al solapamiento de las transmisiones. En un time-slot con colisión se produce una degradación de la SINR en el receptor PU. En algunos casos, si la SINR baja por debajo de cierto umbral, puede causarse una detección incorrecta del paquete en ese time-slot.

El acceso SU pretende ser transparente a la red primaria. Así, no es necesaria la adopción de ningún sistema de señalización en la red primaria (que por supuesto supondría una inversión). Por último es importante destacar que el rendimiento de las comunicaciones PU no debe ser degradado de forma sustancial.

Realizando este tipo de acceso se producen colisiones y debido a que no hay ningún tipo de señalización entre primarios y secundarios se producen colisiones. Las colisiones en este modelo del sistema pueden ser de los siguientes dos tipos:

- **Colisión por ocupación primaria:** este tipo de colisión ocurre cuando un canal está ocupado por un secundario (debido a que lo ha escaneado previamente y lo ha detectado libre), y en un determinado instante de tiempo un usuario primario ocupa ese mismo canal y, como hay señalización entre ellos, se produce la colisión. Esta colisión durará tanto tiempo como necesite el SU para detectarla y desocupar el canal.
- **Colisión por falso negativo:** Esta colisión ocurre debido a un fallo en el escaneo del SU. Cuando un SU está escaneando canales hay una cierta probabilidad de que un canal que está ocupado sea detectado como libre. En ese caso puede que el SU decida transmitir por ese canal y por tanto se produzca la colisión. Como ocurre en el caso anterior, la colisión durará tanto tiempo como necesite el SU para detectar que ha habido colisión y desocupar el canal.

4.2.2.- ACCESO SECUNDARIO SOBRE OPORTUNIDADES ESPACIAL:

TESELADO DUAL

El uso de oportunidades espaciales implica que los canales de la banda frecuencial f_i solo pueden ser usados por los SUs que se encuentran fuera de la celda primaria que usa dicha frecuencia f_i . Esto significa que los SUs no puede detectar la actividad PU en los canales de f_i , aunque, si los SUs están suficientemente alejados de la celda primaria, la interferencia agregada que proviene de estos se puede mantener por debajo de un nivel aceptable.

En el escenario que se plantea, el concepto de oportunidad espacial de una red celular consiste en el uso de un teselado (detallado posteriormente) que permite la reutilización de

espectro y que es diferente al teselado de la red celular primaria (hexagonal). La potencia transmitida por un SU en cada canal es muy pequeña comparada con la transmitida por la estación base. Además, mientras que la localización de la estación base (que suele ser en el exterior y en lugares elevados), está pensada para proveer de cobertura a un área muy amplia, un transmisor secundario es típicamente un terminal, y su localización, ya sea interior o a nivel del suelo, causará que la potencia decrezca mucho más rápido para un distancia dada que la de la estación base primaria. Por tanto, un SU puede usar la frecuencia f_i mucho más cerca que otra estación base primaria que también usa f_i .

Para definir el teselado primario se consideran un conjunto de bandas frecuenciales $\mathcal{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_{\mathcal{F}}\}$ y un teselado sobre \mathbb{R}^2 , donde cada celda es asociada a una frecuencia de la banda \mathcal{F} . Se define la función $T : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathcal{F}$ de tal forma que $x \in \mathbb{R}^2$ pertenece a la frecuencia f_i si $T(x) = f_i$.

4.2.2.1.- DEFINICIÓN DE CELDA DUAL

Dada la función T que caracteriza la estructura celular primaria distribuyendo las frecuencias en \mathbb{R}^2 , se define una celda dual de la frecuencia f_i , D_i , como al conjunto de puntos en \mathbb{R}^2 tal que para todos los $x \in D_i$

$$i = \operatorname{argmax}_j \left\{ \min_{y \in A_j} \|x - y\| \right\}$$

donde A_j denota un conjunto de puntos en \mathbb{R}^2 tal que si $T(y) = f_j$ para $y \in A_j$.

Por lo tanto, **para cualquier punto en una celda dual con la frecuencia dual f_i , la celda primaria que usa esa misma frecuencia se encuentra más lejana que cualquier otra**. De esta forma, la interferencia causada a los PUs es menor que si se usara cualquier otra banda frecuencial.

Dicho de otra forma, se definen las celdas duales que usan la frecuencia f_i como el área geográfica donde la interferencia que recibe un PU causada por un SU ocupando la banda frecuencial f_i es la más pequeña posible. Por tanto, estas celdas duales son las oportunidades espaciales en este modelo. Así, a cualquier ubicación de un SU se asocia a la vez a un frecuencia f_i de una celda primaria A_j , y a una frecuencia f_j asociado a una celda dual D_j , donde $f_i \neq f_j$.

De esta forma, usando celdas duales, la red secundaria determina una estructura celular overlay a la que denominamos teselado dual, que tiene el mismo factor de reutilización que la red primaria y que a la vez aumenta la capacidad de los usuarios secundarios, como se desarrolla posteriormente.

4.2.2.2.- EJEMPLO

Se considera una red celular primaria que usa una estructura de celda hexagonal con factor de reutilización 7. La *figura 4.1* muestra el teselado hexagonal donde cada celda es asignada a cada una de las 7 frecuencias, que se representan con distintos colores. Esta es la clásica estructura celular que asume que localización de las estaciones base sigue un patrón regular solamente considerando la atenuación causada por la distancia. La *figura 4.2* muestra el correspondiente teselado dual donde se destacan las celdas duales asociadas a la celda primaria central (en color rojo). Como se puede apreciar en esta segunda figura, cada celda dual es aproximadamente un triángulo cuyos vértices coinciden con la localización de tres estaciones base. La frecuencia de estas 3 estaciones base determinará la frecuencia de la celda dual. En la práctica, antes de poder usar una oportunidad espacial, un SU necesita detectar las frecuencias de las estaciones base más cercanas para determinar a qué celda dual pertenece. Una forma de hacer esto es muestrear los canales de control o tonos piloto de cada estación base para todas las frecuencias f_i . Las tres frecuencias con la potencia media más elevada recibida se consideran las estaciones base que están más cercanas al usuario secundario.

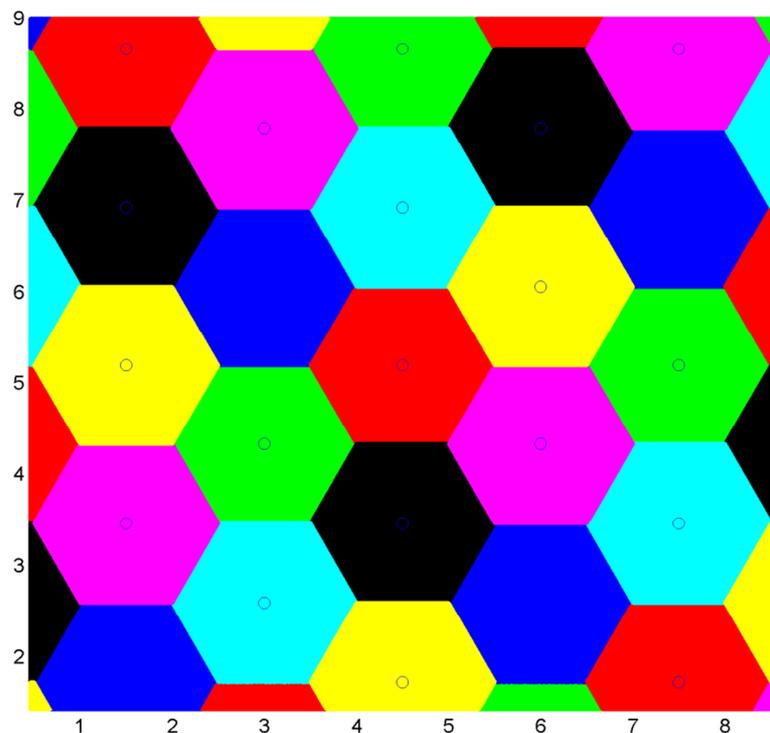


FIGURA 4.1: TESELADO HEXAGONAL PRIMARIO

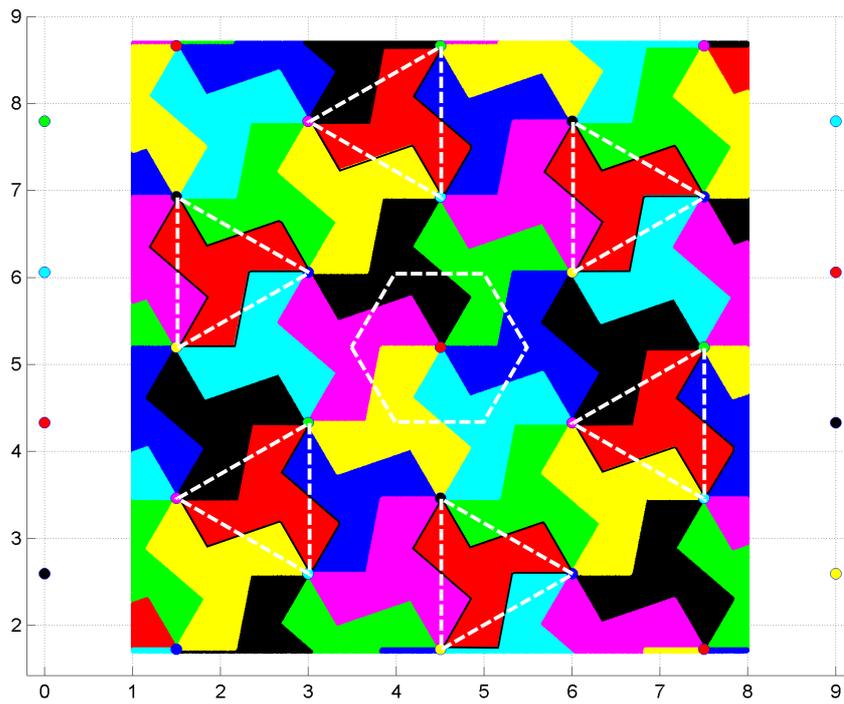


FIGURA 4.2: TESELADO DUAL TEÓRICO

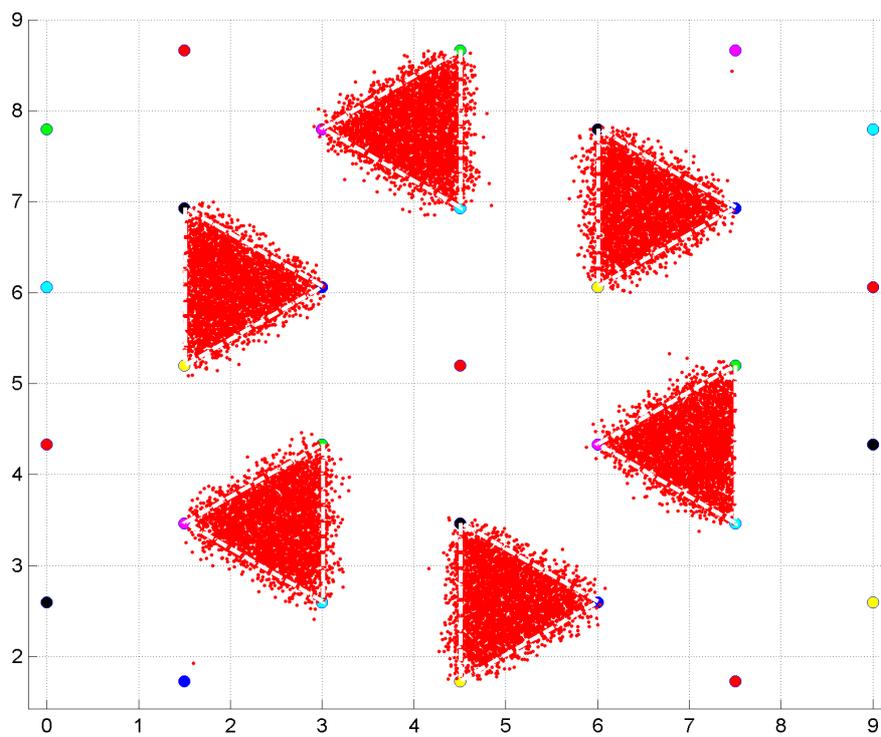


FIGURA 4.3: DETECCIÓN REAL DE LAS CELDAS DUALES PARA UNA FRECUENCIA f_i

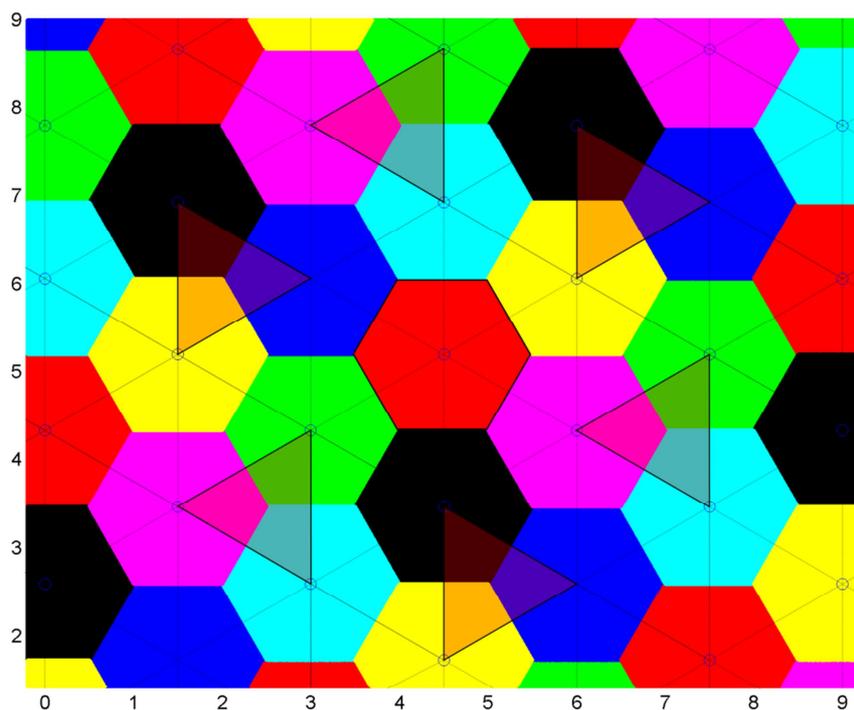


FIGURA 4.4: APROXIMACIÓN DE CELDAS DUALES SOBRE TESELADO PRIMARIO HEXAGONAL

Este proceso no está exento un error de estimación debido a que se considera además de la atenuación en espacio libre la atenuación por propagación multi-camino, que introduce un factor aleatorio a esta detección. En la *figura 4.3*, se muestran las celdas duales obtenidas para una sola frecuencia f_i con un muestreo sujeto a error. El proceso de muestreo que se ha llevado a cabo se detalla en el siguiente capítulo. Por último, en la *figura 4.4* se muestra cómo quedan las celdas duales de la celda central aproximadas con triángulos (aproximación cercana a la detección real) sobre la red celular primaria.

4.2.3.- ACCESO HÍBRIDO

Cuando los SUs usan oportunidades temporales o espaciales, en verdad están usando el teselado primario o el teselado dual respectivamente. La capacidad de la celda primaria o dual está limitada por el número de usuarios secundarios y por el número de canales. Si aumenta el número de usuarios secundarios, estos deberán repartirse los canales de la forma más apropiada, incluso si los receptores están lo suficientemente alejados podrán usar los mismos canales dentro de una celda primaria o dual. Este uso intensivo de canales por un lado aumenta la capacidad del sistema secundario y la utilización del espectro, pero por otro lado puede aumentar la interferencia a los usuarios primarios. En el acceso temporal, al aumentar el número de secundarios, aumenta la probabilidad de que se produzca colisión, ya sea por que

un usuario primario llega a un canal que estaba ocupado por un secundario o porque un secundario detecta como libre un canal que en verdad está ocupado (falso negativo). Por otro lado, en el acceso espacial un aumento de secundarios provoca una mayor interferencia agregada en la celda primaria y la probabilidad de que un canal reciba interferencia de una celda dual también aumenta. Por último, un aumento de secundarios puede provocar, una degradación de las propias comunicaciones secundarias ya que se interfieren entre ellos.

Por tanto, el acceso de secundarios tanto a oportunidades temporales o a oportunidades espaciales está limitado por lo que se menciona anteriormente. Para aumentar la capacidad de los secundarios se propone el **acceso híbrido que proporciona mayor capacidad al sistema secundario y hace un uso más intensivo del espectro**. Esto se debe a que se duplica el área donde cada banda frecuencial puede ser usada por los usuarios secundarios. Así, el acceso híbrido consta de los siguientes 3 pasos:

1. Antes de transmitir, un terminal secundario selecciona aleatoriamente uno de los tipos de acceso. Con probabilidad ρ buscará oportunidades temporales y con probabilidad $1 - \rho$ usará oportunidades espaciales.
2. Si selecciona acceso mediante oportunidades temporales, usará la estrategia MAC descrita anteriormente para encontrar canales libres que pueda ocupar, de forma que mientras no detecte transmisión primaria esos canales podrán ser usados.
3. Si selecciona acceder mediante oportunidades espaciales, usará la estrategia de posicionamiento mencionada anteriormente y que se ejemplifica en la *figura 4.3* para obtener su posición aproximada y así a la celda dual a la que pertenece. De esta forma podrá usar canales correspondientes a la frecuencia asociada a la celda dual en la que se encuentra.

Es importante destacar que el parámetro ρ determina la porción de SUs que se encuentran en una oportunidad temporal o espacial. Es decir, es una forma de balancear el número total de secundarios hacia un tipo de acceso u otro, teniendo en cuenta que para cualquier posición SU hay asociadas dos frecuencias y por tanto dos tipos de acceso. Los diferentes tipos de acceso proporcionan diferentes tipos de interferencia a los terminales primarios.

Las interferencias generadas por SUs que usan oportunidades temporales (interferencias intra-celda) serán muy intensas pero poco frecuentes. Además, durarán un corto periodo de tiempo, dependiente de la precisión que tenga el SU de detectar actividad primaria en los canales que está usando.

Por otro lado, la interferencia proveniente de los SUs que se encuentran en celdas duales se mantiene en el tiempo (a diferencia de la proveniente de interferencias temporales), pero será mucho menos intensa, similar a la interferencia co-canal de otras estaciones base.

Por tanto, la interferencia de celdas duales aumentará el nivel medio de ruido y lo mantendrá más o menos constante. La interferencia temporal mantendrá el nivel medio de ruido más bajo pero habrá picos de ruido muy fuertes que corresponden a las colisiones producidas por los secundarios. Esto se puede ver en las *figuras 4.5 y 4.6*. En la *figura 4.5* se muestra el ruido producido por un acceso puramente espacial (celdas duales). Se puede ver en esta figura que el nivel medio de ruido está en torno a los -145 dBm y no sufre grandes variaciones. Ocurre lo contrario con la *figura 4.6* donde el acceso es puramente temporal. En este caso, el nivel medio de ruido es más bajo, en torno a los -165 dBm, pero se producen picos de interferencia (debido a las colisiones) que llegan hasta los -90 dBm. Cuando se combinan ambos tipos de acceso también se combinan ambos tipos de interferencia.

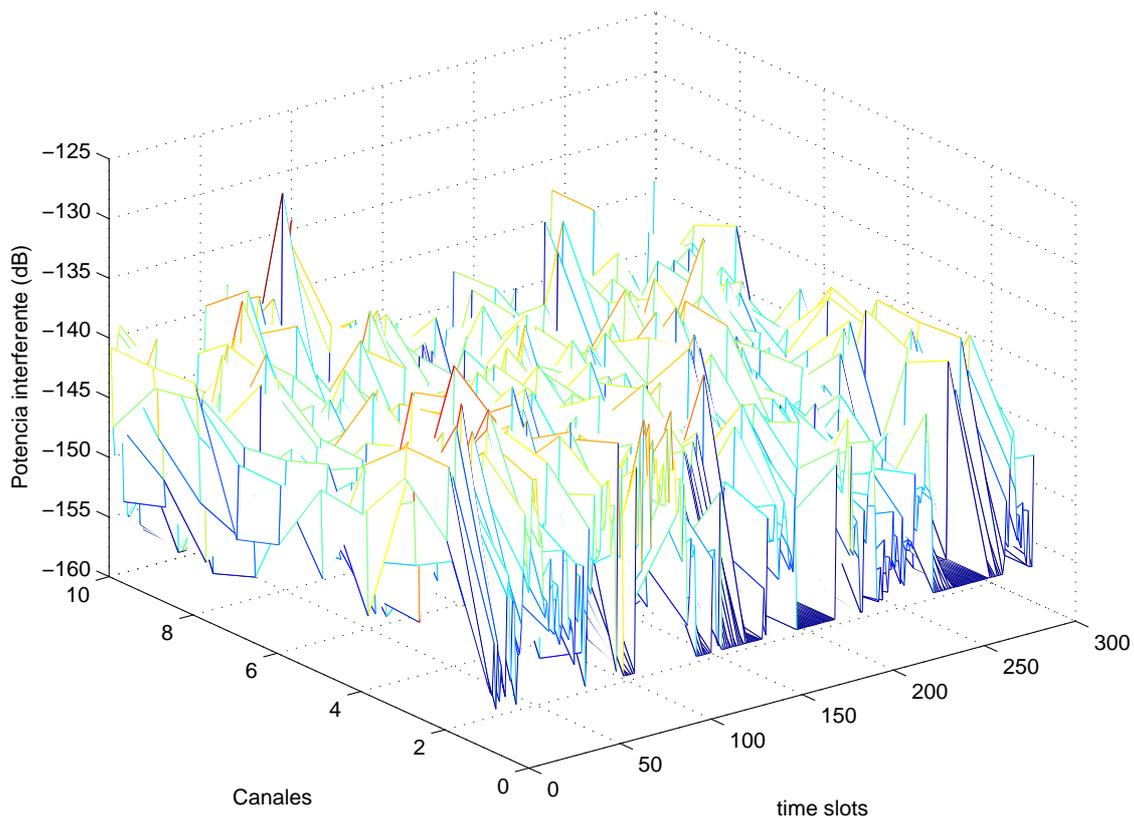


FIGURA 4.5: RUIDO PRODUCIDO POR EL USO DE OPORTUNIDADES ESPACIALES

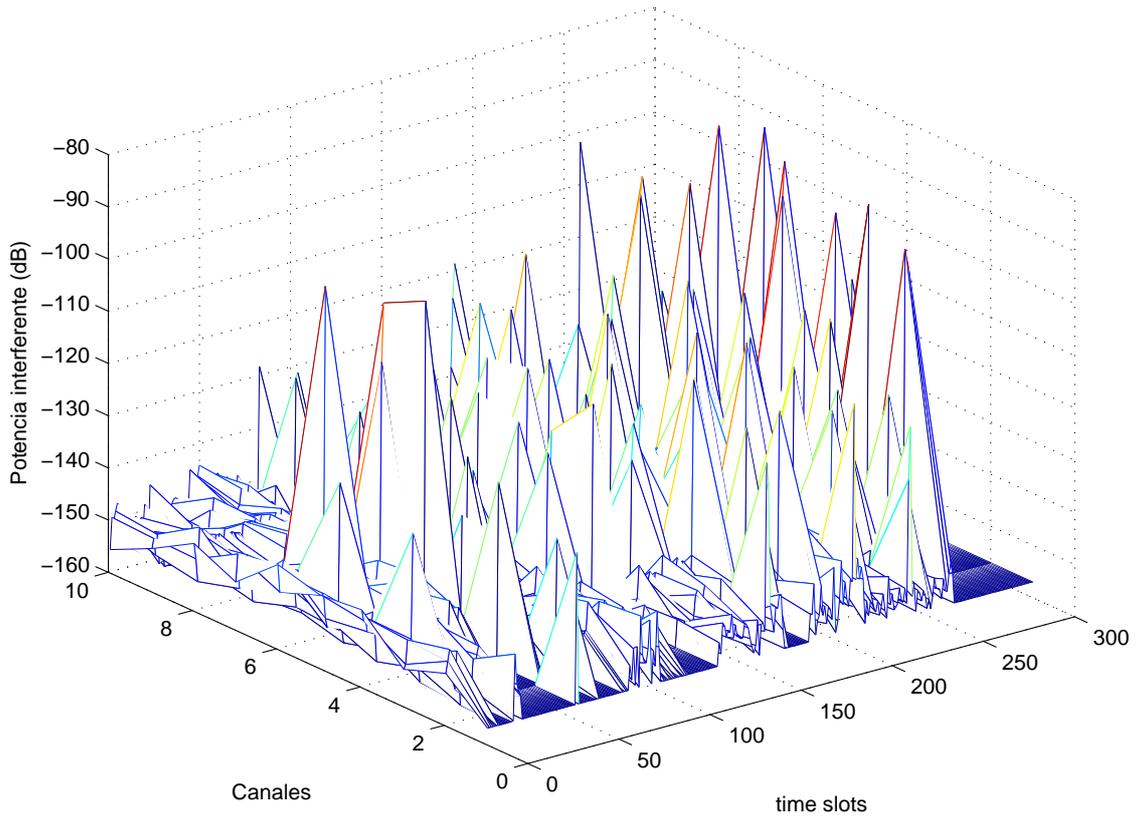


FIGURA 4.6: RUIDO PRODUCIDO POR EL USO DE OPORTUNIDADES TEMPORALES

Para realizar el acceso híbrido de forma apropiada, se deben combinar los efectos de estos dos tipos de interferencia dentro de una sola medida de rendimiento: la probabilidad de recepción correcta de paquete por time-slot. Se considera para el escenario dado, que si el operador posee ambas redes, tanto la primaria (preexistente) como las secundarias, es el operador quien puede determinar el valor apropiado de ρ tal que el rendimiento de los PUs se mantenga dentro de un valor aceptable, y la capacidad de los SUs sea maximizada dentro de las restricciones impuestas.

4.3.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En esta sección se define los parámetros de rendimiento para el usuario primario y secundario y se formula el problema que el operador necesita resolver para obtener el valor de ρ .

Sea Γ_t^{PU} la relación señal a ruido e interferencia (SINR) en un determinado canal de downlink en el time slot t , medido en el receptor PU. Se asume que el receptor PU se encuentra situado en la ubicación del peor caso, es decir, la ubicación en la cual recibe una mayor interferencia de los transmisores secundarios. Solo se consideran las muestras donde haya un PU activo en el canal ($\Gamma_t^{PU} > 0$, para $t = 1, 2 \dots$). La cantidad de SUs interferentes y sus localizaciones,

cambia de forma aleatoria con el tiempo. Sea N_t^{SU} el número de transmisores SU usando el mismo canal (y la banda frecuencial f_i) que el receptor PU en el time slot t . Además, para una localización SU dada, la potencia interferente cambia en el tiempo debido a los efectos del fading. Sea $I_t(n)$ la potencia interferente recibida proveniente el n -ésimo SU interferente en el time slot t . Entonces se tiene que:

$$\Gamma_t^{PU} = \frac{P_{Rx,t}^{PU}}{n + I^{PU} + \sum_{n=1}^{N_t^{SU}} I_t(n)}$$

Donde $P_{Rx,t}^{PU}$ es la potencia útil recibida por el terminal primario en el time slot t , n es el ruido térmico e I^{PU} es la interferencia agregada de las estaciones bases base que usan la misma frecuencia f_i , es decir, la interferencia co-canal.

Es importante destacar que Γ_t^{PU} es un proceso estocástico en tiempo discreto. La probabilidad de recepción correcta en el receptor PU es P_c y viene dada por

$$P_c = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \Phi\{\Gamma_t^{PU} > \gamma\}$$

donde γ es la SINR que determina el umbral de detección. Es decir si $\Gamma_t^{PU} > \gamma$ se recibirá el paquete y en otro caso la recepción será incorrecta. Por otro lado, la función $\Phi\{z\}$ es una función indicador que es igual a 1 cuando la condición z es cierta, y es igual a 0 en caso contrario.

Cuando cada SU accede al espectro, usa m canales contiguos de la banda frecuencial f_i y transmite durante un tiempo aleatorio, que viene dado por un número T_{SU} de time slots. Por tanto, cada transmisión SU puede ser representada por m procesos estocásticos $\Gamma_{t,j}^{SU}$ para $j = 1, \dots, m$ donde cada $\Gamma_{t,j}^{SU}$ representa la SINR para un canal j en un time slot t medido en un receptor SU. Cuando se usan oportunidades temporales, el número de canales usado por un SU puede variar con el tiempo. Esto ocurre cuando el SU detecta que ha colisionado en alguno de sus canales y lo apaga para evitar ocasionar daños graves al PU. Obviamente $\Gamma_{t,j}^{SU} = 0$ si el canal j no está siendo usado, y $\Gamma_{t,j}^{SU} = 0$ para $j = 1, \dots, m$ si $t > T_{SU}$.

Sea C_{max}^S la máxima capacidad alcanzable en ausencia de la interferencia sobre los m canales. La capacidad normalizada para una transmisión SU se calcula según la siguiente expresión:

$$C_s = E \left\{ \frac{1}{T_{SU}} \sum_{t=1}^{T_{SU}} \sum_{j=1}^m W \log_2(1 + \Gamma_{t,j}^{SU}) / C_{max}^S \right\}$$

La probabilidad de seleccionar oportunidad temporal, ρ , determina la evolución de los procesos estocásticos de los cuales se computan los parámetros P_c y C_s . Así, para un valor dado de ρ , se pueden expresar los parámetros de rendimiento como $P_c(\rho)$ y $C_s(\rho)$. El objetivo de diseño de este sistema con acceso híbrido es seleccionar un valor de ρ tal que se maximice $C_s(\rho)$ por un lado, mientras que $P_c(\rho)$ se mantenga por encima de un mínimo requerido que se denomina \check{P}_c . Por tanto esto se puede expresar mediante el siguiente problema de optimización:

$$\max_{\rho} C_s(\rho), \text{ sujeto a } P_c(\rho) \geq \check{P}_c, \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

Es importante destacar que no se espera encontrar el máximo de $C_s(\rho)$ en $\rho = 0$ o en $\rho = 1$, ya que estos dos valores minimizan el área donde los usuarios secundarios pueden usar cada banda frecuencial f_i . Por tanto, es intuitivo pensar que el valor de ρ que maximiza la capacidad se debe encontrar entre esos dos puntos y, como se desarrolla en el capítulo 6, hay un óptimo que por tanto motiva la resolución de este problema.

Encontrar el valor óptimo de ρ es una tarea complicada debido a que los procesos estocásticos Γ_t^{PU} y $\Gamma_{t,j}^{SU}$ dependen de la interacción de un número aleatorio de terminales que se encuentra distribuidos por el espacio de forma aleatoria y tienen en cuenta los efectos del fading entre cada par transmisor y receptor. Además, Γ_t^{PU} y $\Gamma_{t,j}^{SU}$ toman valores de un valores de un espacio continuo, lo que hace que no se pueden aplicar técnicas Markovianas a este problema. Por ello, ha sido necesario abordarlo mediante Monte-Carlo como se explica en el siguiente capítulo.

5. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO

5.1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los detalles de la aproximación mediante Monte-Carlo que se han usado para la evaluación de P_c y C_s en el escenario descrito en el capítulo anterior. Se abordan pormenorizadamente algunos aspectos como el modelo de canal, la generación de tráfico primario y secundario y el cálculo de los estadísticos de estimación de rendimiento.

5.2.- MODELO DE CANAL

5.2.1- PIECEWISE LINEAL (MULTI-SLOPE) MODEL

Para el modelo de canal, se consideran pérdidas por propagación en espacio libre y atenuación multi-camino. El modelo para las pérdidas por espacio libre es Piecewise Linear (Multi-Slope) [10]. Es un modelo empírico de pérdidas de propagación. En la *figura 5.1* se pueden ver las rectas que aproximan los puntos (mediciones de potencia). Un modelo Piecewise con N segmentos debe tener $N - 1$ puntos de ruptura de la curva y sus correspondientes N pendientes s_1, s_2, \dots, s_N . Para calcular el número de puntos de ruptura y su posición se pueden usar diferentes métodos. Una vez posicionados los puntos de ruptura, las pendientes se pueden calcular por regresión lineal.

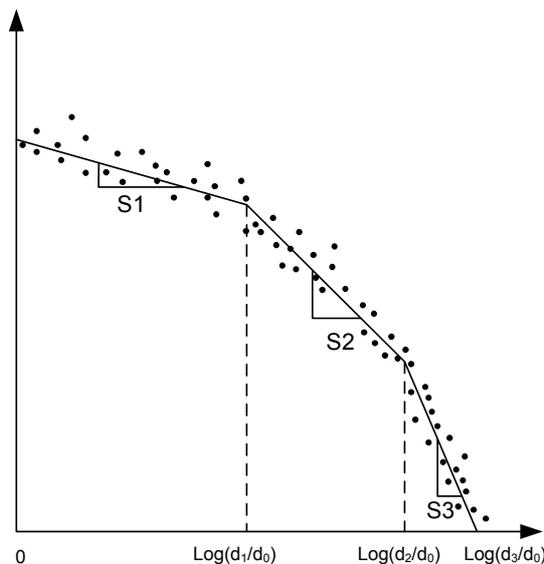


FIGURA 5.1: MODELO DE PROPAGACIÓN PIECEWISE LINEAL

Por otro lado, mientras las pérdidas por la propagación en el espacio libre toman un valor fijo que solo depende de la potencia, el fading o atenuación multi-camino es la variación de la

potencia de la señal a lo largo del tiempo en un determinado medio de propagación. Esta variación con el tiempo se suele modelar como un proceso aleatorio, que para este modelo sigue una distribución exponencial. No se ha tenido en cuenta la atenuación debida a obstáculos o shadow fading.

5.2.2.- PIECEWISE DUAL-SLOPE

Un caso particular de este modelo es en el que solo hay dos pendientes. Este se caracteriza por tener un valor K constante, un exponente γ_1 para una distancia d_0 que es menor que una distancia crítica d_c . A partir de esta distancia d_c las pérdidas de canal caen con una pendiente γ_2 .

$$P_r(d)dB = \begin{cases} P_t + K - 10\gamma_1 \log_{10}(d/d_0) & d_0 \leq d \leq d_c \\ P_t + K - 10\gamma_1 \log_{10}(d_c/d_0) - 10\gamma_2 \log_{10}(d/d_c) & d > d_c \end{cases}$$

Se ha escogido este modelo porque estadísticamente es una buena aproximación al sistema a simular debido a la planificación de la propia red celular. Para la potencia transmitida por la estación base se ha elegido una distancia crítica de que coincide aproximadamente con el radio de la celda. Esto implica que va a haber una atenuación por espacio libre con una pendiente γ_1 hasta el final de la celda. A partir de ahí su pendiente de atenuación aumentará, tomando un valor de γ_2 . Esto modela que estadísticamente en toda la longitud del radio de la celda haya algún obstáculo que haga que las pérdidas sean de ese orden.

Los usuarios secundarios, al no encontrarse en situaciones tan privilegiadas (a nivel de suelo o en interiores) como las estaciones base, su señal se atenúa más rápido con la distancia. Además las transmisiones suelen tener distancias cortas (redes ad-hoc). Por ello, tienen una distancia crítica mucho menor.

5.3.- GENERACIÓN DE TRÁFICO

Las celdas primarias tienen un radio $R = 700$ m y usa un factor de reutilización de 7 como se describe en el capítulo 4. El área usada para generar terminales en localizaciones aleatorias es un rectángulo con las dimensiones $6R \times 4\sqrt{3}R$. Con esta aproximación numérica solo se evalúa una banda frecuencial f_i . Las intensidades de tráfico de las redes primaria y secundaria se determinan con la probabilidad de llegada de PUs y SUs respectivamente en cada time slot. En cada celda primaria de frecuencia f_i solo puede haber una llegada de un PU cada time slot, y cada PU activo puede salir del sistema con una probabilidad de 0.1.

En cuanto a las transmisiones SU, el número de nuevos terminales cognitivos generados en cada time slot sigue una distribución de probabilidad binomial, con 20 intentos que tienen una probabilidad p_{SU} de generar un SU. Cada terminal secundario generado puede ser ubicado en cualquier posición de todo el área simulada, por lo que habrá muchos de estos terminales que al no influir en la frecuencia f_i , no intervendrán en la evolución de la evaluación numérica.

La probabilidad de que un SU activo abandone el sistema en cada time slot es igual a 0.05. Lo que se pretende al usar una distribución binomial en las llegadas y reducir la probabilidad de salida de 0.1 a 0.05 (respecto al sistema primario) es aumentar mucho el tráfico secundario, o dicho de otra forma, el número medio de usuarios secundarios en el sistema.

Debido a que al área a simular es de dimensiones considerables y que muchos de los SUs que se generan no participan en la evaluación numérica por no estar en ubicaciones en las que se use la frecuencia f_i o sí estar en estas posiciones pero decidir transmitir por otra frecuencia (debido a que la decisión de la frecuencia a transmitir es probabilística), es necesario que el número total de SUs sea considerablemente grande para que tengan repercusión en el sistema primario.

5.4.- COMUNICACIONES SECUNDARIAS

De acuerdo con la naturaleza ad-hoc de las comunicaciones secundarias, se ha fijado la distancia entre transmisor y receptor secundario a 90 m, que como se puede apreciar, es notablemente menor que R . Se ha escogido un valor fijo para la distancia entre transmisor y receptor primario como valor medio o esperado de las posibles distancias que se pudieran dar. De esta forma se reduce un poco la complejidad del simulador y se agilizan los cálculos.

Además, debido a la interferencia co-canal entre los propios SUs, solo podrán haber tres transmisiones secundarias sobre el mismo canal en la misma celda primaria o secundaria. Teniendo esto en cuenta, podría haber hasta 6 SUs transmitiendo por el mismo canal de forma simultánea, tres en un hueco temporal, y otros tres repartidos entre las diferentes celdas duales.

5.5.- DECISIÓN DE TRANSMISIÓN

Con probabilidad $1 - \rho$ un SU que llega al sistema busca oportunidad espacial. Para ello escanea los tonos piloto de las 7 bandas frecuenciales de la red y toma 7 muestras cada una de ellas. Para cada f_i todas las muestras tomadas se promedian si 2 o más muestras se han recibido por encima del umbral de sensibilidad (-80 dBm), es decir, se promedia si se han recibido dos o más muestras de una banda frecuencial f_i . Las tres frecuencias que en media se

reciban con más potencia se considera que corresponde a las tres estaciones base más cercanas y, por tanto, determinan la celda dual en la que se encuentra el SU.

Se ha considerado también en el simulador el caso poco frecuente en que un SU solo promedia las frecuencias de dos estaciones base. Es decir, solo ha recibido dos o más muestras por encima del umbral de dos estaciones base. En este caso, como no tiene información suficiente para saber en qué celda dual se encuentra, selecciona aleatoriamente con una probabilidad de 0.5 la celda una de las dos celdas definidas por esas dos estaciones base.

Parámetro	Valor asignado
Transmisores Primarios	
Número de canales de downlink, N	10
Ancho de banda de un canal, W	200 KHz
Radio de la celda R	700 m
Potencia útil media recibida por los PUs	- 78 dBm
SINR umbral para detección de paquete en PUs, γ	- 17 dB
Ruido de base en PUs ($N + I_{PU}$)	- 110 dBm
Potencia de transmisión del tono piloto	12 W
Transmisores Secundarios	
Potencia media transmitida por canal	0.5 W
Distancia transmisor - receptor	90 m
Número de canales simultáneos máximos a usar, m	3 canales
Probabilidad de falso negativo (escaneo)	0.9
Probabilidad de detección de colisión	0.8
Umbral de detección de la frecuencia f_i	-80 dBm
Número de muestras en la detección de f_i	7
Parámetros de propagación	
Exponentes de pérdidas γ_1, γ_2	2.4, 4.2
Factor de propagación, K	-46.7 dB
Distancia crítica para las transmisiones procedentes de la estación base	1.2R m
Distancia crítica para las transmisiones entre SUs	100 m

TABLA 1: PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN NUMÉRICA

Con probabilidad ρ un SU que llega al sistema busca una oportunidad temporal. Antes de empezar la transmisión, escanea los canales con una probabilidad de detección correcta en cada canal es de 0.9, o lo que es lo mismo, con una probabilidad de falso negativo es igual a 0.1. En el modelo no se considera una probabilidad de falso positivo, por lo que en la simulación, cuando un SU esté escaneando canales los canales que estén libres los detectará siempre como libres y los que estén ocupados los detectará como ocupados con una probabilidad de 0.9. Además, durante la transmisión, la probabilidad de detección de colisión por parte de la pareja SU es de 0.8. Esto quiere decir que si un SU está transmitiendo por un canal j de una banda frecuencial f_i y un determinado slot un PU empieza a transmitir por ese mismo canal j de la banda frecuencial f_i , con una probabilidad de 0.8 el SU dejará de transmitir en el siguiente time slot. Con probabilidad $0.2 \cdot 0.8$ estará 2 time slots transmitiendo, con probabilidad $0.2^2 \cdot 0.8$ estará 3 time slots transmitiendo, etc.

5.6.- CÁLCULO DE LOS ESTIMADORES DE RENDIMIENTO

Para estimar los valores de P_c y C_s , se toman muestras del proceso de SINR (Γ_t^{PU}), en dos posibles ubicaciones PU, en el borde y en el centro de la celda primaria.

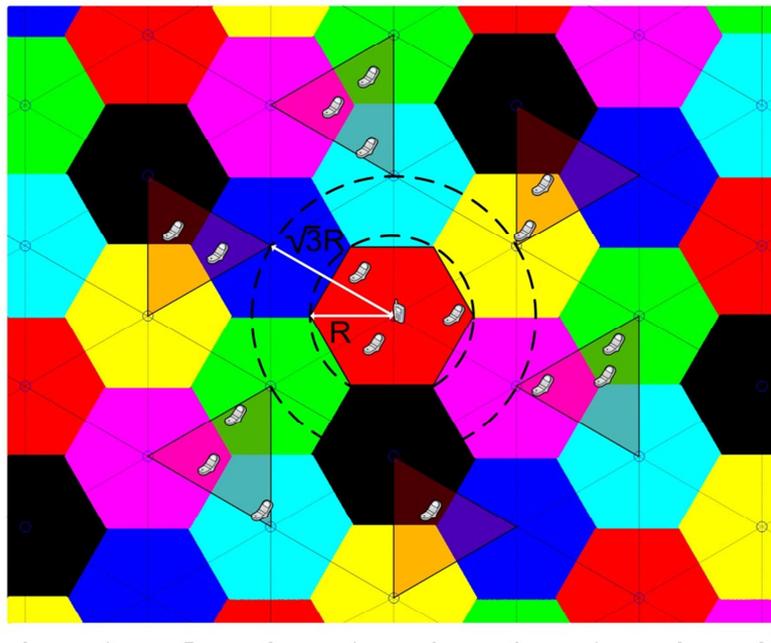


FIGURA 5.2: DISTANCIAS DE TERMINALES INTERFERENTES AL CENTRO DE LA CELDA

Esto ha sido necesario debido a que la gravedad de la interferencia que los SUs causan a los PUs también es relativa a la posición de los PUs. Así, un PU que se encuentra en el centro de la celda primaria recibirá interferencias fuertes de todos los SUs que transmitan en hueco temporal ya que todos ellos se encontraran a una distancia menor o igual que R , como se observa en la *figura 5.2*.

Por otro lado, las interferencias que provienen de celdas duales se encuentran a una distancia mayor o igual que $\sqrt{3}R$, es decir, la interferencia de celda dual está acotada y es independiente de la celda dual que venga, ya que todas están igual de alejadas del centro de la celda.

Por el contrario, a un PU que se encuentra en el borde de la celda, la interferencias producidas por colisiones de huecos temporales pueden proceder de SUs que se encuentren a una distancia de hasta aproximadamente $2R$, por lo que en media serán menos importantes. O dicho de otra forma, la integración de las distancias de todos los posibles puntos de la celda al borde es mayor que la integración de las distancias de todos los posibles puntos de la celda hacia el centro, por lo que al ser la distancia mayor en media, mayor será la atenuación de la señal.

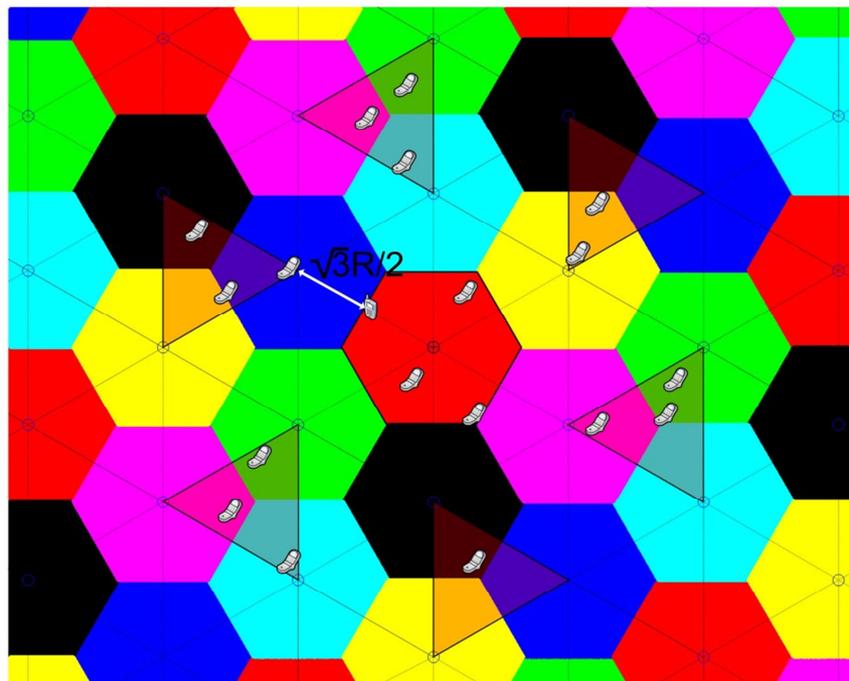


FIGURA 5.3: DISTANCIA DE LOS TERMINALES INTERFERENTES AL BORDE DE LA CELDA

Por otro lado, para un SU que se encuentra en el borde de la celda (como se puede ver en la *figura 5.3*), no todas las interferencias proveniente de celdas duales son iguales, ya que algunas celdas duales se encuentran muy alejadas (a una distancia del orden de $3R$), y sobre todo hay una o dos se encuentran muy cerca. En el peor caso puede haber un SU transmitiendo en una celda dual a una distancia de $\sqrt{3}R/2$ m. Además, estas transmisiones se mantienen en el tiempo (a diferencia de la interferencia en hueco temporal) por lo que la interferencia es mucho más dañina.

Por todo ello, en cada time slot solo se usa la muestra de SINR más baja de las medidas en las posiciones descritas anteriormente para general la muestra de P_c . De esta forma, siempre se observa el peor caso y, por tanto, lo que se pretende es mantener este peor caso dentro de unos límites razonables. Para calcular \hat{P}_c , que es la estimación de P_c , simplemente se calcula la media aritmética de las muestras.

Surge un problema a la hora de calcular C_s , y es que el área simulada correspondiente a celda primaria, no es el mismo que el correspondiente a celdas duales. En el simulador se ha simulado una celda primaria y sus 6 celdas duales correspondientes. Realizando unos sencillos cálculos se puede comprobar que la suma de las áreas de las celdas duales simuladas es más de 3 veces el área de celda primaria simulada. Por tanto, a misma densidad de SUs por m^2 , habrá más del triple de SUs transmitiendo en celda dual, ya que los SUs se generan uniformemente distribuidos. Dicho esto, resulta obvio que se van a tomar más del triple de muestras provenientes de usuarios que están en celdas duales, por lo que es necesario tener esto en cuenta a la hora de realizar la medida. Para ello, se calculan de forma separada la capacidad usando huecos temporales (C_s^T) y la capacidad usando huecos espaciales (C_s^S) mediante los estimadores \hat{C}_s^T y \hat{C}_s^S . Estos estimadores se calculan realizando la media aritmética de las muestras tomadas en SUs que se encuentran transmitiendo en huecos temporales y en oportunidades espaciales respectivamente.

Ahora, al calcular las capacidades medias \hat{C}_s^T y \hat{C}_s^S se evita el problema asociado a la desigualdad de usuarios transmitiendo en huecos temporales o espaciales que se menciona anteriormente. Para obtener la expresión de \hat{C}_s a partir de los estimadores \hat{C}_s^T y \hat{C}_s^S , es necesario tener en cuenta que dado el mismo número de SUs en celdas primarias o duales, el número medio de transmisiones por celda primaria o dual es proporcional a ρ . Por lo que para poder calcular la capacidad de forma correcta es necesario ponderar los valores de \hat{C}_s^T y \hat{C}_s^S con el parámetro ρ . Así la expresión que determina \hat{C}_s queda de la siguiente forma:

$$\hat{C}_s = (1 - \rho)\hat{C}_s^S + \rho\hat{C}_s^T$$

Los resultados de la evaluación numérica realizada con las medidas de rendimiento del sistema desarrolladas en este capítulo, se muestran en el siguiente capítulo, donde además de mostrar los resultados se muestran las conclusiones finales del proyecto.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1.- RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN NUMÉRICA

En este capítulo final se muestran y analizan los resultados obtenidos por la evaluación numérica del sistema descrito en capítulos anteriores.

Es evidente que tanto el tráfico primario como el secundario van a tener un importante impacto en las medidas de rendimiento P_c y C_s . Por un lado, el volumen de tráfico primario determina la cantidad de huecos temporales que habrá en las celdas primarias y el número de terminales interferidos. Es decir, con un bajo volumen de tráfico primario va a haber muchos huecos temporales y además, los SUs que ocupen dichos huecos raramente interferirán a los PU debido a que, con tráfico bajo, la probabilidad de colisión es muy reducida. Con un volumen alto de tráfico primario ocurre lo contrario, que quedan pocos huecos temporales. Además, debido a la escasa existencia de estos huecos, la probabilidad de que un nuevo PU que llegue al sistema elija un hueco ya ocupado por un SU es mucho mayor, por lo que la probabilidad de colisión aumenta.

Teniendo en cuenta esto, queda patente que el rendimiento del sistema además de depender de ρ , dependerá de los tráficos primario y secundario. Por ello resulta interesante ver cómo afecta cada uno de estos factores a la estrategia de acceso híbrido y para obtener el valor óptimo de ρ en cada caso.

Para un valor dado de p_{SU} (que indica la cantidad de tráfico secundario), se consideran diferentes intensidades de tráfico primario. Se miden estas intensidades como el número medio de canales ocupados por los usuarios primarios para la banda frecuencial f_i de medida. Como se puede ver en la leyenda de las figuras, la intensidad de tráfico se mide como porcentaje de canales ocupados, que indican el número medio de primarios que están usando los canales de la banda frecuencial f_i .

Además de las dos medidas de rendimiento descritas en el capítulo 4, se ha tomado una tercera medida que, aunque no es tan relevante como las otras dos, ayuda a entender el funcionamiento del sistema. Esta medida es la relación señal a ruido e interferencia (SINR) media y se calcula como la media aritmética de las muestras de SINR tomadas en la evaluación numérica.

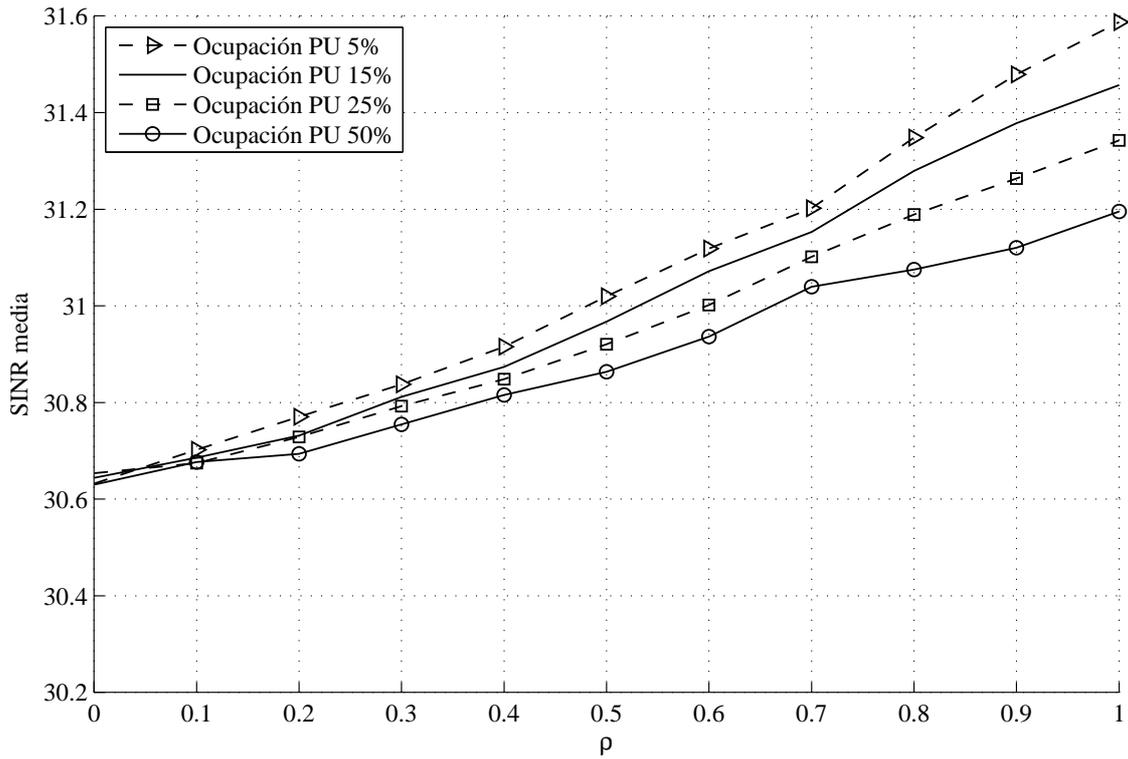


FIGURA 6.1: SINR MEDIA PARA $p_{SU} = 0.1$

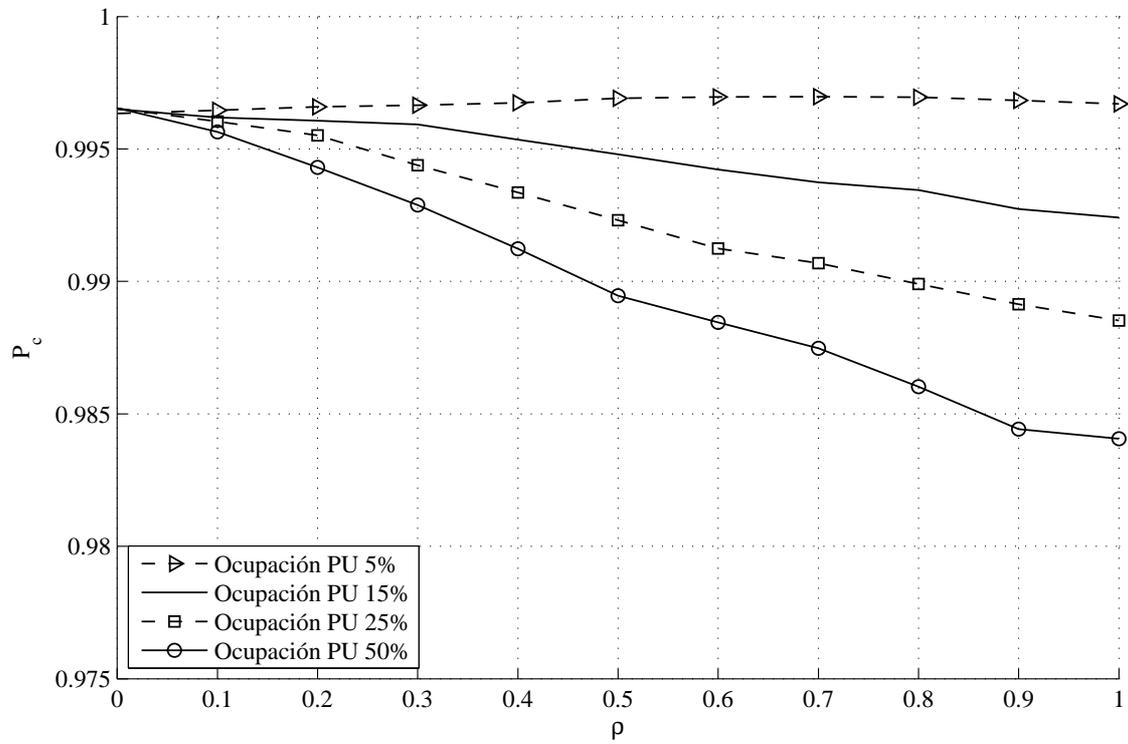


FIGURA 6.2: PROBABILIDAD DE TRANSMISIÓN CORRECTA PARA $p_{SU} = 0.1$

En las *figuras 6.1, 6.2 y 6.3*, se muestran los distintos valores de tráfico primario para un tráfico secundario dado de $p_{SU} = 0.1$. Como se puede observar en la *figura 6.1*, la SINR media crece con el valor de ρ . Es decir, al aumentar el número medio de usuarios en oportunidades temporales y al reducirse el número medio de usuarios en oportunidades espaciales, se observa un aumento de la SINR.

Por el contrario, resulta interesante observar la *figura 6.2*, donde la tendencia es la contraria. A mayor número de usuarios usando oportunidades temporales, se observa una tendencia descendente de la probabilidad de transmisión correcta. Estos dos resultados pueden parecer opuestos, pero se entienden muy fácilmente teniendo en cuenta los dos tipos de interferencias (temporales y espaciales) y cual predomina para cada valor de ρ . Como se desarrolla en el capítulo 4 y se puede ver en las *figuras 4.5 y 4.6*, la interferencias recibidas por SUs que usan oportunidades temporales suelen ser muy cortas de duración y muy intensas (en comparación con el otro tipo). Las interferencias de este tipo suelen tener un valor medio bajo y picos de alto valor. Por otro lado las interferencias ocasionadas por SUs que usan oportunidades espaciales suelen ser prolongadas en el tiempo y de más baja intensidad, debido a que estos SUs se encuentran más alejados geográficamente. Así, las interferencias de este tipo tienen un valor medio más elevado pero no tanta variabilidad como las anteriores.

Por todo ello, tiene sentido pensar que cuando ρ toma valores cercanos a 0, hay una mayoría de SUs usando oportunidades espaciales. Debido a la naturaleza de este tipo de interferencias el nivel medio de ruido aumenta (SINR medio disminuye). Este tipo de interferencia no toma valores suficientemente altos como para que se produzcan demasiadas pérdidas de paquete.

Por otro lado, cuando ρ toma valores cercanos a 1, predomina el uso de oportunidades temporales. Como este tipo de interferencia tiene un valor medio menor, la interferencia media disminuye (SINR aumenta). Además de esto, lo picos de interferencia producidos por las colisiones producen pérdidas de paquetes. Así que en general, a mayor valor de ρ mayor probabilidad de pérdida de paquete.

También se puede observar en las figuras cómo afecta el valor del tráfico primario. La idea principal es que **cuanto más tráfico primario, pero es el efecto de uso de oportunidades temporales**. En la *figura 6.1*, se puede ver cómo las curvas de menos tráfico primario obtienen siempre mejores valores de SINR medio debido a que son menos afectadas por las colisiones. Para $\rho = 0$, se obtiene aproximadamente el mismo valor de SINR medio para cualquier tráfico debido a que la interferencia por el uso de oportunidades espaciales afecta de forma independiente al tráfico primario y en este caso no hay colisiones por uso de oportunidades temporales.

Ocurre algo análogo en la *figura 6.2*, donde a mayor tráfico primario mayor es la caída de la curva con el aumento de ρ , es decir, mayor perjuicio por colisiones temporales. Cuando $\rho = 0$ se obtienen valores similares para todas las curvas debido a lo mencionado anteriormente: no ha colisiones temporales y las interferencia por uso de oportunidades espaciales afecta independientemente del tráfico. También se puede destacar de esta gráfica que para tráficos muy reducidos, en este caso del 5%, se obtienen resultados similares independientemente del valor de ρ . Al haber tan poco tráfico, se producen interferencias temporales con una probabilidad muy baja y estas pérdidas se compensan con la reducción del número de usuarios transmitiendo en oportunidades espaciales.

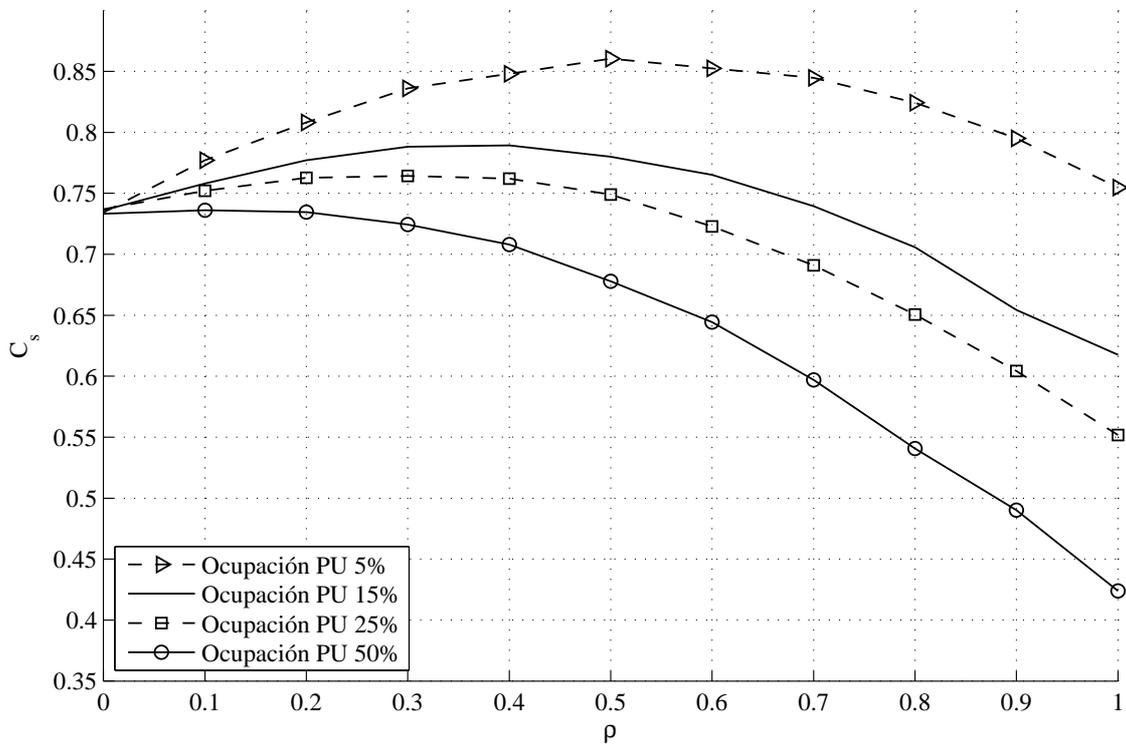


FIGURA 6.3: CAPACIDAD SU PARA $p_{SU} = 0.1$

Esto solo ocurre con tráficos primario muy bajos, como en este caso del 5% de ocupación. Para tráficos mayores, el uso de oportunidades temporales siempre es un perjuicio para los PUs. Por lo que se puede decir que, en general (salvo para tráficos PU muy bajos), **a los PUs siempre les conviene que los terminales interferentes se encuentren en la celda dual y el hecho de permitirles usar la celda primaria mediante oportunidades temporales siempre les aporta perjuicio**. Esta es la misma conclusión que se puede extraer de los resultados del escenario básico en el capítulo 2.

Entonces, el beneficio asociado al uso de oportunidades temporales es debido a que en ese caso los SUs tienen a su disposición el doble de área para transmitir por una misma frecuencia,

o dicho de otra forma, cualquier su podrá transmitir por dos bandas frecuenciales diferentes en cualquier punto de la red celular. Esto nos lleva a un **aumento de la capacidad de los SUs** ya que, dado un área de $A \text{ m}^2$ y N_{SU} SUs, usando el acceso híbrido, se les permite a los N_{SU} SUs transmitir por el doble de canales dentro del área A , aumentando su capacidad y reduciendo la interferencias co-canal que se producen entre ellos mismos. Por otro lado el acceso híbrido implica un **uso intensivo del espectro** ya que se explotan tanto oportunidades temporales como espaciales de forma simultánea.

Este aumento de capacidad de los SUs se puede observar en la *figura 6.3*, donde se aprecia un óptimo para la capacidad de los secundarios en función de ρ . Se puede observar que este óptimo no toma el mismo valor de ρ en las diferentes curvas depende del tráfico primario y es más pequeño cuando mayor es el tráfico primario. Cuanto mayor tráfico primario, más colisiones se producirán, lo que se traduce como más paquetes perdidos también para los SUs y, por tanto, menos conveniente es para estos usar oportunidades temporales. Para valores bajos de tráfico primario ocurre lo contrario, es conveniente usar oportunidades temporales debido a que hay baja probabilidad de colisión. Por ello el máximo con la ocupación PU al 5% se encuentra más cercano a 1 que cuando la ocupación PU está al 50%.

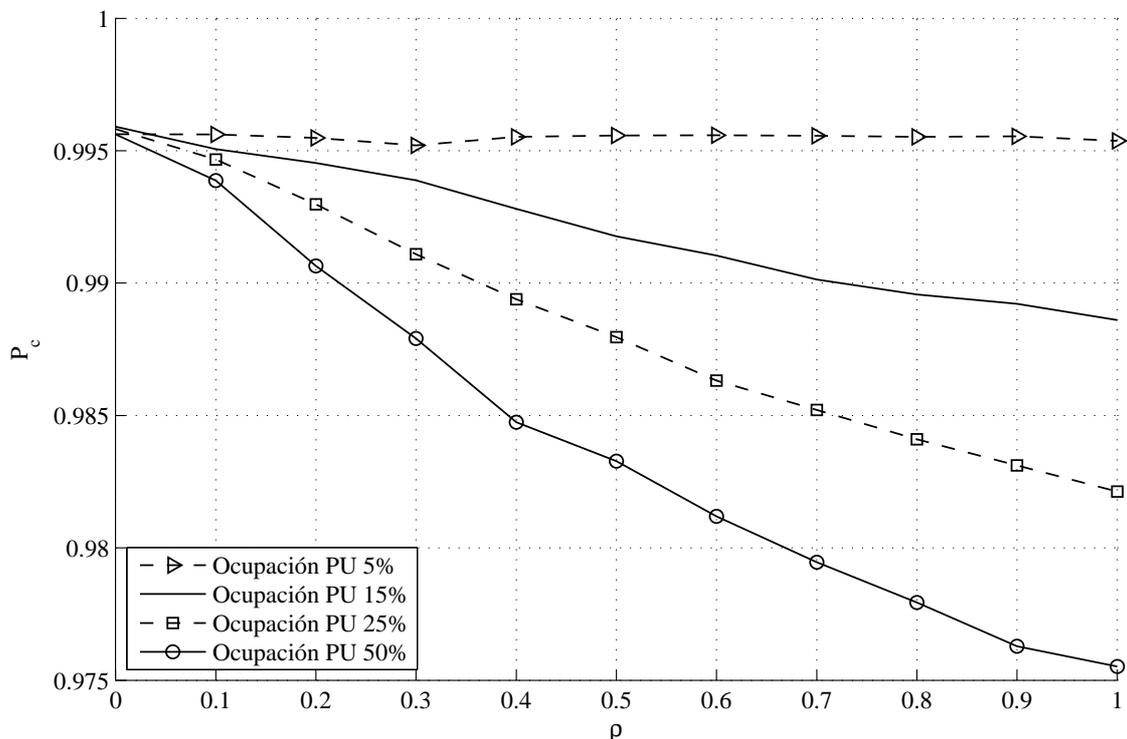


FIGURA 6.4: PROBABILIDAD DE TRANSMISIÓN CORRECTA PARA $p_{\text{SU}} = 0.2$

Por último, solo queda por mencionar la influencia del tráfico secundario sobre los resultados. En las *figura 6.4* y *figura 6.5* se muestran la probabilidad de transmisión correcta y la capacidad de los SUs respectivamente. Estas dos figuras se han calculado usando un tráfico SU más alto ($p_{SU} = 0.2$). Como se puede observar en la *figura 6.4*, los valores de la probabilidad de transmisión correcta y de capacidad de los SUs son siempre menores que cuando el tráfico era más alto (*figura 6.2* y *figura 6.3*). Esto es debido a que al haber más SUs, se interfieren más entre ellos y se usa el espectro de forma más intensiva. Por otro lado se puede ver que los óptimos de la capacidad de los secundarios (*figura 6.5*) se encuentran en este caso más cercanos a 1 que en la *figura 6.3* aun siendo los valores de de tráfico PU los mismos. Esto es debido a que al haber más SUs en el sistema, estos necesitan más capacidad. Como la capacidad en las celdas duales es limitada, se ven obligados a usar huecos temporales en mayor medida que en el caso anterior. Por tanto, los óptimos de capacidad secundaria para un tráfico mayor de SUs toman valores más altos de ρ .

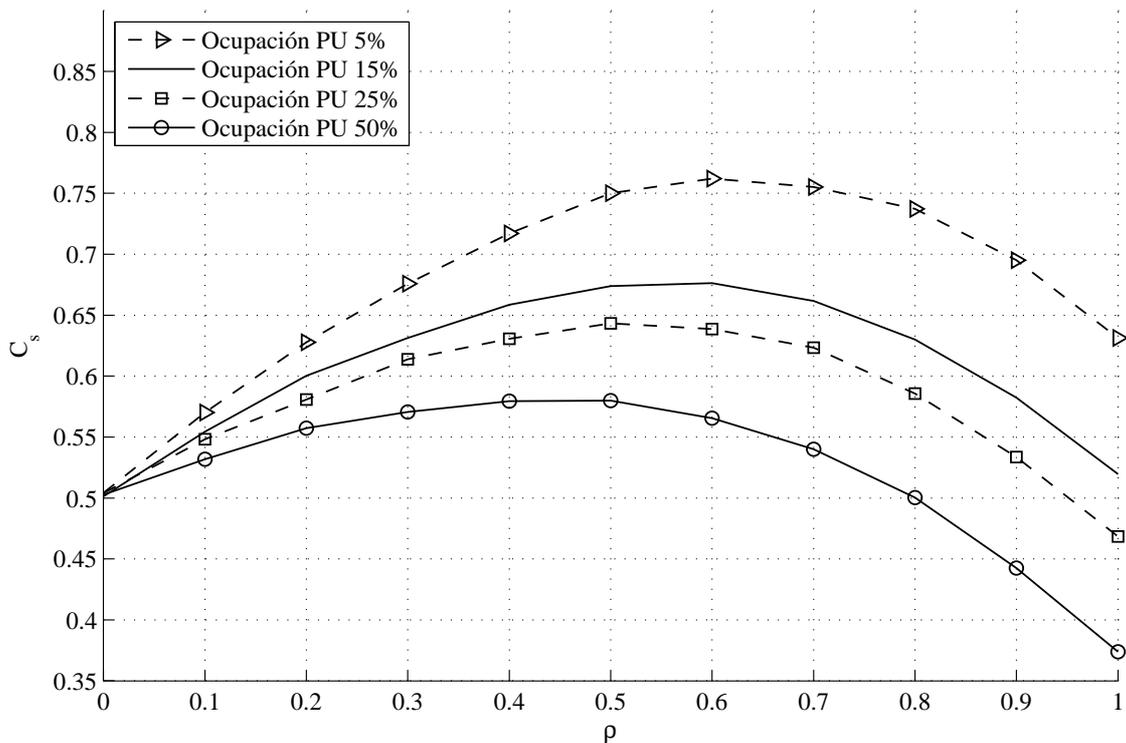


FIGURA 6.5: CAPACIDAD SU PARA $p_{SU} = 0.2$

6.2.- ESTIMACIÓN DEL ρ ÓPTIMO

Como se menciona en el capítulo anterior, el valor de ρ debe ser ajustado por el operador, que es el propietario de ambas redes. Esto se debe a que para determinar el valor de ρ es necesario conocer tanto el tráfico primario como el secundario. Así, la obtención de ρ se hace mediante los siguientes pasos:

1. Se fija un valor mínimo para la P_c que se denominará \check{P}_c . Este valor mínimo, dependiendo del tráfico primario descarta o no un rango de posibles ρ utilizables.
2. Se escoge un valor de ρ tal que se encuentre lo más cerca del óptimo que se pueda (o el óptimo si es posible) para C_s estando este ρ dentro del rango de ρ no descartado en el paso anterior. Es decir, que el valor de ρ escogido no esté por debajo de \check{P}_c .

De esta forma se maximiza la capacidad de los usuarios secundarios acotando el perjuicio que se causa a los usuarios primarios.

La elección del ρ apropiado debe hacerse de forma dinámica por el operador de tal forma que el sistema vaya aprendiendo y convergiendo de la forma rápida al ρ óptimo en cada momento.

6.2.1.- EJEMPLO

Usando las gráficas obtenidas para $p_{SU} = 0.2$, se fija $\check{P}_c = 0.99$. En la parte de arriba de la *figura 6.6* se puede ver la gráfica de P_c en donde se dibuja solo la parte de las curvas que cumple con el valor de \check{P}_c fijado. Además, se puede ver el valor de ρ escogido para cada curva (de cada tráfico primario). Estos valores se reflejan también en la *tabla 6.1*. Como se puede ver, para los valores de ocupación primaria del 25% y del 50%, se escoge un valor lo más cercano al óptimo de la capacidad de los secundarios dentro del límite impuesto por \check{P}_c . Por el contrario para los valores de ocupación primaria del 5% y del 15%, se escoge el valor de ρ que optimiza la capacidad de los SUs.

Tráfico primario	ρ óptimo
5 %	0.6
15 %	0.6
25 %	0.36
50 %	0.22

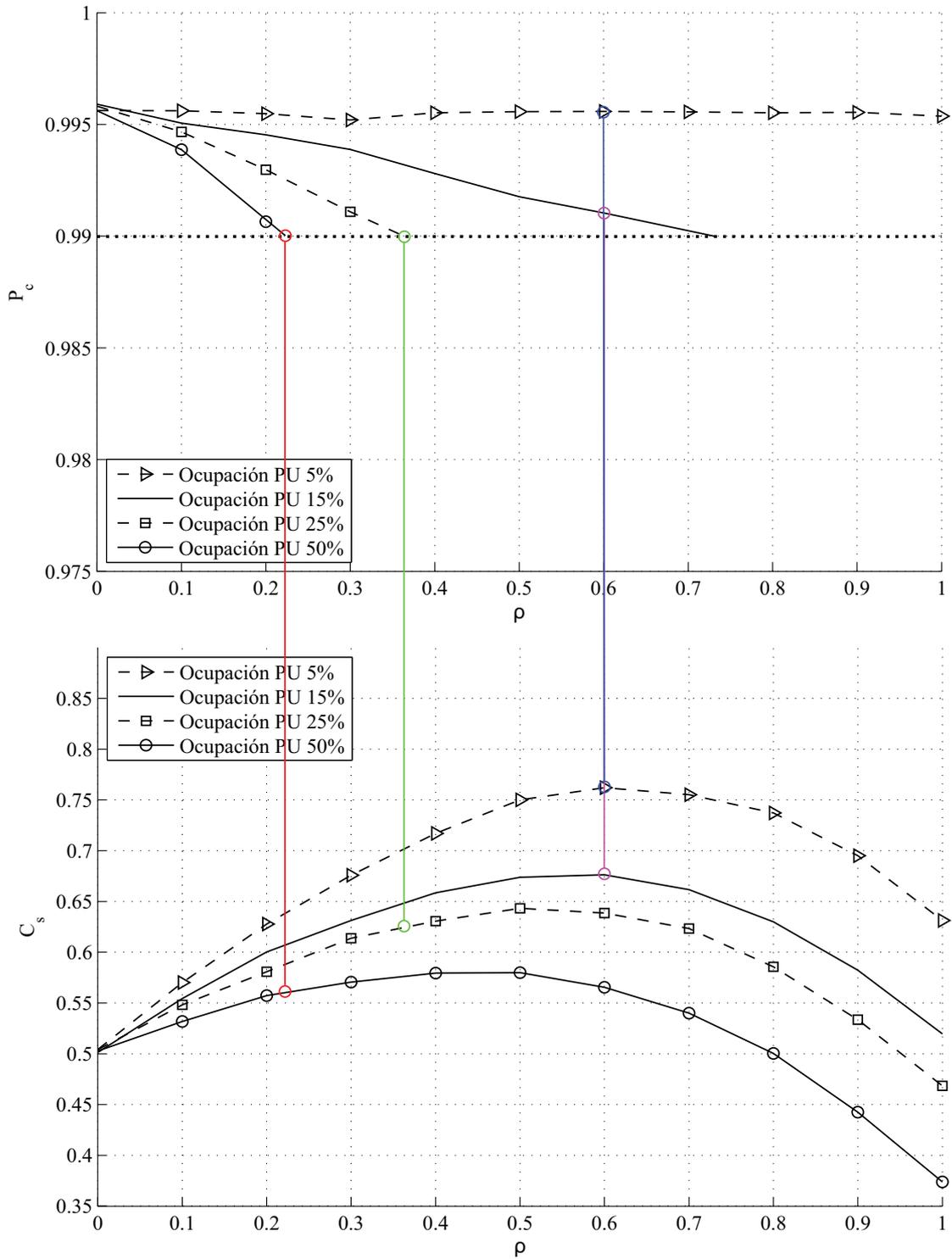


FIGURA 6.6: EJEMPLO DE OBTENCIÓN DE ρ ÓPTIMO

6.3.- CONCLUSIONES

En este proyecto se presenta un método de acceso híbrido que combina el uso de oportunidades temporales con el de oportunidades espaciales. Se introduce el nuevo concepto de teselado dual, que permite que usuario secundario use oportunidades temporales (mediante el teselado primario) u oportunidades espaciales (mediante el teselado dual). El objetivo final es permitir al operador reutilizar el espectro de la red celular preexistente por sí mismo. Por tanto, los terminales de las nuevas redes son los usuarios secundarios para la red preexistente. El operador puede controlar la proporción de secundarios usando cada esquema de acceso (temporal o espacial) determinando el valor de ρ que es la probabilidad de usar una oportunidad temporal. Para los usuarios secundarios, el valor ρ que optimiza su capacidad depende de la intensidad de tráfico de las redes primaria y secundaria. Por ello, el operador debe monitorizar estas intensidades de tráfico para así determinar el valor óptimo de ρ , asegurando que el rendimiento de los usuarios primario siempre está por encima de un umbral dado. Debido a que el valor óptimo de ρ siempre es diferente de 0 y de 1, el acceso híbrido provee al sistema de una mayor capacidad para los usuarios secundarios que cualquiera de los dos métodos de forma separada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **J.J. Alcaraz, J.A. Ayala-Romero, M. Lopez-Martinez, J. Vales-Alonso**, "Combining Dual Tessellation and Temporal Oportunities for Spectrum Reuse in Cellular System", *submitted to The Eleventh International Symposium on Wireless Communication Systems*
- [2] **E. Biglieri, A. Goldsmith, L. Greenstein, N. Mandayam, H. Poor**, Principles of Cognitive Radio, *Cambridge University Press, 2013.*
- [3] **J.J. Alcaraz, et.al**, "Background Detection of Primary User Activity in Opportunistic Spectrum Access" *submitted to the 1st IEEE International Workshop on Cognitive Cellular Systems.*
- [4] **R.Broderson, A. Wolisz, D. Cabric, S. Mubaraq Mishra, D. Willkomm**. "Corvus: A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum." *Universidad de Berkeley y Universidad de Berlín. Julio, 2004.*
- [5] **N. Hoven and A. Sahai**, "Power scaling for cognitive radio," *in Proc. WirelessCom Symposium on Emerging Networks, Technologies and Standards, June 2005.*
- [6] **E.G. Larsson, M. Skoglund**, "Cognitive radio in a frequency planned environment: Some basic limits", *IEEE Transactions on Wireless Communications 7 (2008)*
- [7] **E. Axell, E.G. Larsson, D. Danev**. "Capacity considerations for uncoordinated communication in geographical spectrum holes." *Linköping University 2009*
- [8] **J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen**, "HC-MAC: A Hardware-constrained Cognitive MAC for Efficient Spectrum Management", *in IEEE JSAC special issue on "cognitive radio - Theory and Applications", Vol. 26, Issue 1, Jan. 2008*
- [9] **L. Kleinrock**, Queueing Systems, Volume I: Theory, 1975 :Wiley
- [10] **A. Goldsmith**, Wireless Communications, *Cambridge University Press, 2005.*
- [11] **L. Ma, X. Han and C. C. Shen**, "Dynamic Open Spectrum Sharing MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks,"*Proc. First IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, November 2005.*

- [12] **P. Papadimitratos, S. Sankaranarayanan and A. Mishra**, "A bandwidth sharing approach to improve licensed spectrum utilization," *Proc. First IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, November 2005.
- [13] **Tuan Do and Brian L. Mark**, "Joint Spatial-Temporal Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks," in *IEEE CISS, Baltimore MD, 2009*, pp. 124-129.
- [14] **Qihui Wu, G. Ding, J. Wang and Y. Yao**, "Spatial-Temporal Opportunity Detection for Spectrum Heterogeneous Cognitive Radio Networks: Two-Dimensional Sensing," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 12, no. 2, pp. 516-526, Feb. 2013.
- [15] **G. Ding, Q. Wu, F. Song, X. Li and J. Wang**, "Joint exploration and exploitation of spatial-temporal spectrum hole for cognitive vehicle radios," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC '11)*, September 2011.
- [16] **M. G. Khoshkholgh, K. Navaie, and H. Yanikomeroglu**, "Access strategies for spectrum sharing in fading environment: overlay, underlay and mixed," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 9, no. 12, pp. 1780-1793, Dec. 2010.