

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

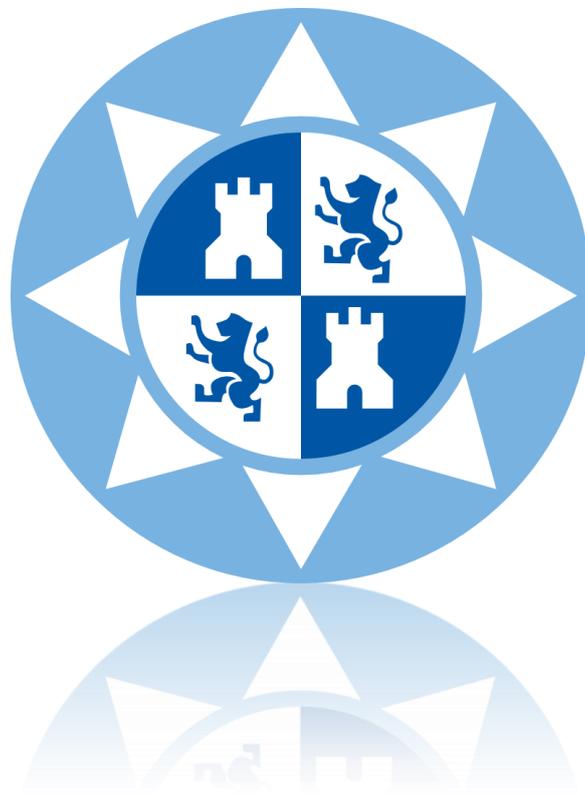
Proyecto Fin de Carrera

Estudio de mecanismos de acceso dinámico
al espectro en radio cognitiva

Autor: Mario Torrecillas Rodríguez

Director: Juan José Alcaraz Espín

01/01/2011



Contenido

1.Introducción	9
1.1 Motivo del estudio.....	9
1.2 Definiciones	10
1.2.1 Bandas frecuenciales	10
1.2.2 Gestión del espectro frecuencial.....	10
1.2.3 Radio cognitiva	13
1.3 Objetivo del estudio	21
1.4 Propuesta de solución	22
1.6 Entorno de trabajo	24
1.6.1 Matlab.....	24
1.6.2 CVX.....	24
1.7 Enumeración del resto de apartados	25
2. Trabajos relacionados.....	26
2.1 CORVUS.....	26
2.1.1 Funcionamiento del sistema	26
2.1.2 Arquitectura del sistema	30
2.2 DIMSUMNet.....	31
2.2.1 Funcionamiento de DIMSUMNet	31
2.2.2 Arquitectura de DIMSUMNet	34
2.3 DRiVE	36
2.3.1 Introducción	36
2.3.2 Arquitectura de DRiVE.....	37
3. Descripción de la solución	40
3.1 Modelado mediante un Proceso de Decisión de Markov	41

3.1.1 Cadenas de Markov	41
3.1.2 Procesos de decisión de Markov	44
3.1.3 Modelo propuesto	48
3.2 Modelado mediante un Proceso de Decisión de Markov con restricciones.....	55
3.2.1 Concepto de programación lineal y algoritmo simplex.....	55
3.2.2 Modelo propuesto.....	58
3.3 Implementación del simulador.....	62
4. Pruebas	67
4.1 Introducción.....	67
4.2 Escenario 1.....	68
4.2.1 Descripción del escenario.....	68
4.2.2 Resultados del modelo basado en MDP.....	69
4.2.3 Resultados del modelo basado en CMDP.....	69
4.2.4 Resultados del simulador	70
4.3 Escenario 2.....	71
4.3.1 Descripción del escenario.....	71
4.3.2 Resultados del modelo basado en MDP.....	72
4.3.3 Resultados del modelo basado en CMDP.....	72
4.3.4 Resultados del simulador	73
4.4 Escenario 3.....	74
4.4.1 Descripción del escenario.....	74
4.4.2 Resultados del modelo basado en MDP.....	75
4.4.3 Resultados del modelo basado en CMDP.....	75
4.4.4 Resultados del simulador	76
4.5 Escenario 4.....	77
4.5.1 Descripción del escenario.....	77

4.5.2 Resultados del modelo basado en MDP.....	77
4.5.3 Resultados del modelo basado en CMDP.....	78
4.5.4 Resultados del simulador	79
5. Conclusiones.....	80
5.1 Resultados del estudio	80
5.2 Líneas de trabajo futuras.....	82
Bibliografía.....	83

Índice de figuras

Figura 1: Asignación de las bandas de frecuencia	10
Figura 2: Repartición del espectro GSM y UMTS en España	11
Figura 3: Spectrum hole.....	14
Figura 4: Pila de protocolos en radio cognitiva	15
Figura 5: Frente de pareto genérico	18
Figura 6: Ciclo cognitivo.....	18
Figura 7: Componentes en un nodo de radio cognitiva	19
Figura 8: Ilustración del espectro en CORVUS.....	28
Figura 9: Pila de protocolos ISO/OSI para radio cognitiva	30
Figura 10: Banda de acceso coordinado.....	32
Figura 11: Utilización espectral en redes con múltiples proveedores.	33
Figura 12: Arquitectura de DIMSUMnet.....	34
Figura 13: Arquitectura de un cliente y una estación base en DIMSUMnet.....	35
Figura 14: Arquitectura de un servicio multimedia en un entorno radio dinámico heterogéneo.	37
Figura 15: Arquitectura funcional de la red.	38
Figura 16: Grafo de transición de probabilidad.....	43
Figura 17: MDP	44
Figura 18: Cadena de Markov asociada a un sistema de dos canales.....	51
Figura 19: Diagrama de flujo del simulador	64
Figura 20: Frente de Pareto Escenario 1 (MDP)	69
Figura 21: Frente de Pareto Escenario 1 (Programación Lineal).....	69
Figura 22: Frente de Pareto Escenario 1 (Simulación)	70
Figura 23: Frente de Pareto Escenario 2 (MDP)	72
Figura 24: Frente de Pareto Escenario 2 (Programación Lineal).....	72
Figura 25: Frente de Pareto Escenario 2 (Simulación)	73
Figura 26: Frente de Pareto Escenario 3 (MDP)	75
Figura 27: Frente de Pareto Escenario 3 (Programación Lineal).....	75
Figura 28: Frente de Pareto Escenario 3 (Simulación)	76

Figura 29: Frente de Pareto Escenario 4 (MDP)	78
Figura 30: Frente de Pareto Escenario 4 (Programación Lineal).....	78
Figura 31: Frente de Pareto Escenario 4 (Simulación)	79

Índice de tablas

Tabla 1: Mapeo entre el número de usuarios y el estado.....	49
Tabla 2: Valores de la variable de control	51
Tabla 3: Parámetros del escenario 1	68
Tabla 4: Valores de interés de la simulación del Escenario 1.....	70
Tabla 5: Parámetros del escenario 2	71
Tabla 6: Valores de interés de la simulación del Escenario 2.....	73
Tabla 7: Parámetros del escenario 3	74
Tabla 8: Valores de interés de la simulación del Escenario 3.....	76
Tabla 9: Parámetros del escenario 4	77
Tabla 10: Valores de interés de la simulación del Escenario 4.....	79

Abstracto

La radio cognitiva está considerada como una prometedora solución al problema de la ineficiencia en el uso de las bandas frecuenciales en redes de acceso inalámbrico causada por el esquema de licencias tradicional que actualmente se emplea.

En el marco de trabajo de la radio cognitiva, el acceso dinámico al espectro (*Dynamic Spectrum Access, DSA*) se refiere al procedimiento de permitir a usuarios sin licencia acceder de forma temporal a una parte del espectro asociado a un usuario con licencia. El objetivo de un protocolo *DSA* es, por tanto, permitir a usuarios secundarios aprovechar los *spectrum holes* u oportunidades espectrales con el menor impacto posible en la calidad del servicio experimentada por los usuarios primarios (por ejemplo, la probabilidad de bloqueo).

Un sistema *DSA* puede ser implementado tanto de forma centralizada como de forma distribuida. Cuando un sistema central gestiona el espectro, obtiene la información necesaria para tomar decisiones óptimas dados unos ciertos objetivos y restricciones. Una implementación centralizada, además, puede incorporar un sistema de subasta que permita establecer el precio de las oportunidades espectrales en tiempo real. Este aspecto sin embargo no será contemplado en este proyecto, dado que estará centrado en optimizar las probabilidades de bloqueo de cada tipo de usuario.

Debido a que estas decisiones son tomadas de forma dinámica (por ejemplo, el acceso a una red con usuarios que entran y salen de la misma) la programación dinámica es una herramienta matemática válida para la formulación rigurosa de un problema de decisión *DSA*.

Adicionalmente, el proceso de ocupación del espectro, del mismo modo que cualquier otro sistema de comunicaciones, puede ser caracterizado con un modelo de *Markov* que, aplicado a la formulación de la programación dinámica, resulta en un proceso de decisión de Markov (*MDP*).

1.Introducción

1.1 Motivo del estudio

A lo largo de los últimos años las comunicaciones inalámbricas y, más concretamente, aquellas relativas a la telefonía móvil, han ido creciendo de forma exponencial, aumentando de forma dramática el número de usuarios y de compañías que proporcionan estos servicios a lo largo de todo el mundo.

Al contrario que las tecnologías cableadas, las tecnologías sin cables comparten el medio físico, lo que convierte al mismo en un recurso muy valioso que ha de ser cuidadosamente asignado y gestionado para minimizar las interferencias y maximizar el número y la calidad de los servicios ofrecidos.

La Radio Cognitiva (*Cognitive Radio, CR*) es una tecnología que se encuentra bajo estudio en estos momentos en universidades y centros de investigación de todo el mundo, que potencialmente puede optimizar el uso de este medio. Dicha tecnología se basa en la infrautilización del espectro frecuencial que actualmente tiene lugar.

En efecto, los rangos de frecuencias son asignados a determinadas compañías de forma estática para que éstas puedan operar. El principal problema de este hecho es que deriva en un desuso del mismo la mayor parte del tiempo. Gracias a la radio cognitiva es posible que otras compañías hagan uso de determinados canales en momentos en los que no están siendo utilizados, maximizando por tanto su utilización.

Este proceso se puede realizar en base a distintas políticas que han de ser estudiadas previamente a su implementación en un sistema real.

El motivo de este estudio es, por tanto, el interés generalizado que existe en torno a esta tecnología y su potencial utilidad conforme se incrementa el uso de este tipo de sistemas inalámbricos.

Dado que estos dispositivos se diseñan especialmente sobre software, lo que se pretende es, a partir de una serie de simulaciones, observar el comportamiento de un

sistema de radio cognitiva y la mejora que éste supone frente a un sistema de comunicación inalámbrica tradicional.

1.2 Definiciones

1.2.1 Bandas frecuenciales

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos son diseñados en base a la transmisión de ondas electromagnéticas con frecuencias comprendidas en el rango de los 3 Hz a los 300 GHz. Estas ondas radioeléctricas son transmitidas y recibidas a través de antenas que transforman la energía eléctrica en energía electromagnética y viceversa. Las ondas de radio con diferentes frecuencias tienen diferentes características de propagación, cada una adecuada para un propósito determinado (ver Figura 1).

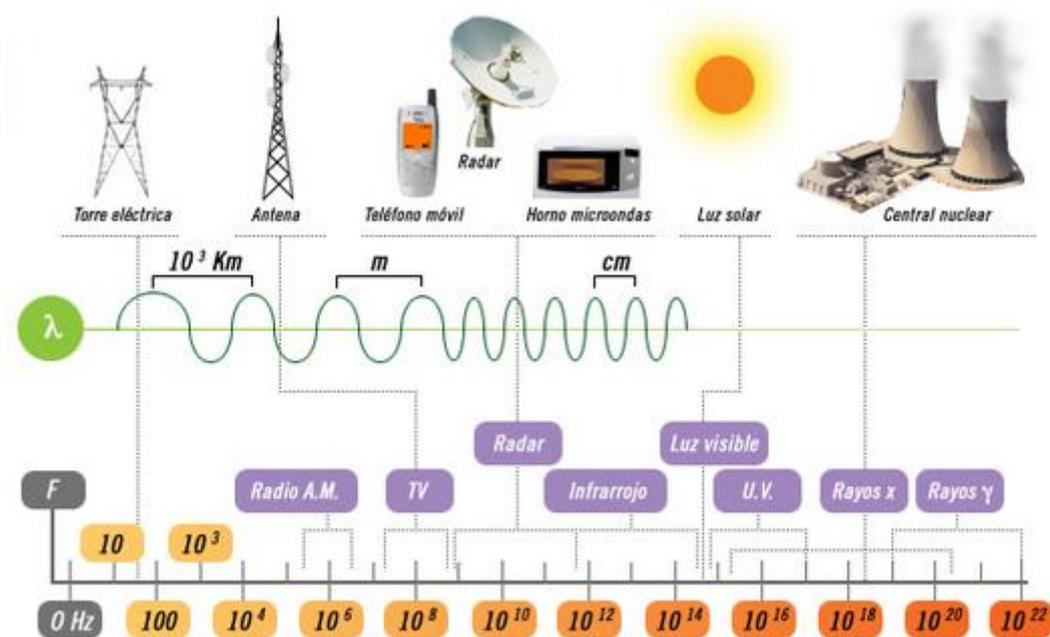


Figura 1: Asignación de las bandas de frecuencia

1.2.2 Gestión del espectro frecuencial

Las interferencias tienen lugar cuando las ondas de radio son transmitidas de forma simultánea desde distintas fuentes a través de la misma frecuencia. Por tanto,

es necesario que el espectro se gestione de una forma adecuada para que distintos servicios de comunicaciones puedan coexistir haciendo uso del mismo medio.

En el modelo tradicional de gestión del espectro, definido por la Comisión Federal de las Comunicaciones (*Federal Communications Commission, FCC*), las bandas de frecuencia son asignadas a los usuarios autorizados por el gobierno. El método es conocido como “subasta del espectro” (*Spectrum Auction*). En una subasta de espectro, el gobierno pone a libre disposición un determinado rango de frecuencias especificando un cierto tipo de comunicación inalámbrica para el que está destinado. Las compañías o usuarios interesados pueden participar en la subasta, siendo el gobierno quien finalmente selecciona al ganador (generalmente aquél dispuesto a pagar una mayor cantidad de dinero), el cual podrá hacer uso de la banda bajo una serie de regulaciones, normas, y durante un tiempo determinado.

La siguiente figura muestra la repartición del espectro perteneciente a GSM y UMTS entre las distintas compañías de comunicaciones móviles en España (ver Figura 2).

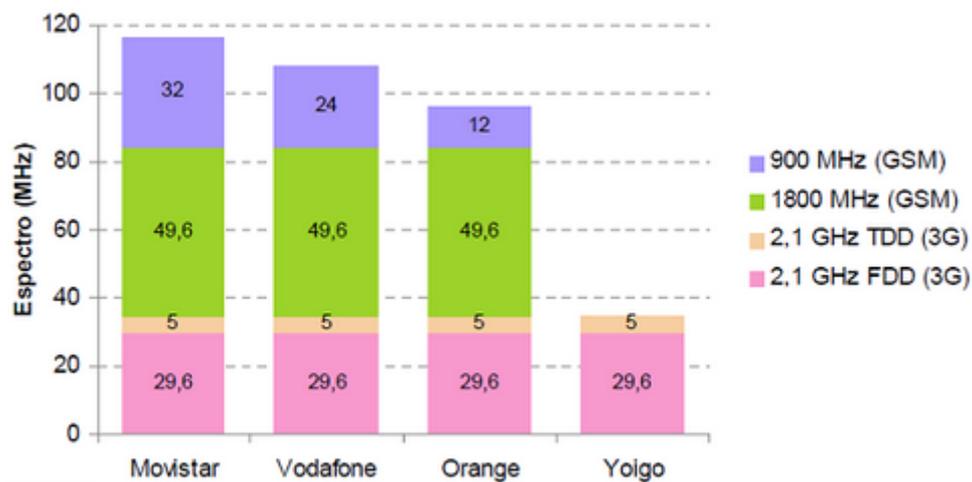


Figura 2: Repartición del espectro GSM y UMTS en España

El método de asignación del espectro descrito anteriormente garantiza que una banda es utilizada exclusivamente por un usuario autorizado; sin embargo, esto ocasiona un uso muy ineficiente del espectro (1).

Las limitaciones a la hora de acceder al espectro derivadas de dicho esquema de asignación pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

- **Bandas espectrales asignadas a una tecnología fija:** Por ejemplo, una banda asignada a la transmisión de televisión analógica no puede ser utilizada por la televisión digital o tecnologías inalámbricas de banda ancha. Sin embargo, dicha banda puede estar siendo altamente inutilizada en muchas regiones debido a la utilización de sistemas de televisión cableados.
- **Licencias para una región muy grande:** Cuando se licencia una banda del espectro, se asigna normalmente a un usuario o servicio particular en una región muy amplia (por ejemplo, una ciudad entera). Sin embargo, la entidad que proporciona el servicio podría emplear únicamente esa banda de frecuencia en áreas con un número alto de clientes, para así obtener el máximo beneficio. Como consecuencia de esto el espectro permanece nuevamente inutilizado en otras áreas dado que ningún otro proveedor puede acceder a ellas.
- **Gran cantidad de espectro por cada licencia:** Un proveedor de servicios obtiene la licencia en base a un amplio rango del espectro (por ejemplo, 50 MHz). Sin embargo, en muchas ocasiones sólo requieren un pequeño ancho de banda para dar cobertura en momentos puntuales y regiones concretas donde se concentra una gran cantidad de tráfico, quedando el resto en desuso.
- **Imposibilidad para los usuarios sin licencia de acceder al espectro:** Sólo los usuarios licenciados pueden acceder al espectro con el actual esquema de licencias, incluso cuando los mismos no están ocupando la totalidad de los canales. Por ejemplo, en un sistema celular pueden existir áreas donde no existen usuarios. En tal caso, un usuario sin licencia no podría acceder al espectro, a pesar de que su transmisión no interferiría con ninguna otra.

Para poder satisfacer la demanda de las nuevas tecnologías inalámbricas se solicitó a la FCC cambiar la política de asignación del espectro.

Entre estas recomendaciones estaban (2):

- Mejorar la flexibilidad de utilización del espectro.
- Tener en cuenta todos los aspectos de la utilización del espectro en la nueva política.
- Fomentar un uso eficiente del espectro.

Los objetivos que había detrás de estas recomendaciones eran mejorar tanto la eficiencia técnica como la económica. Desde la perspectiva técnica, la gestión del espectro ha de garantizar el menor nivel posible de interferencias y la mayor utilización posible del ancho de banda disponible. Por otra parte, la perspectiva económica trata de obtener el mayor beneficio posible de esta utilización.

Diferentes modelos para la gestión del espectro han sido introducidos para diferentes rangos de frecuencias y aplicaciones inalámbricas (2). Estos modelos han mejorado la flexibilidad de la utilización del espectro y abierto nuevas oportunidades para diferentes tecnologías. Para explotar dichas oportunidades, los transceptores inalámbricos han de ser inteligentes, operando en función de las condiciones del medio en tiempo real.

1.2.3 Radio cognitiva

1.2.3.1 Introducción

Como ya se ha mencionado, la radio cognitiva es un nuevo paradigma del diseño de sistemas de comunicaciones inalámbricas que pretende mejorar de forma significativa la utilización del espectro frecuencial, y su motivación es el incremento de la demanda causado por las nuevas aplicaciones emergentes para los usuarios de la telefonía móvil.

El modelo de gestión del espectro explicado en el apartado anterior da lugar a las conocidas como oportunidades espectrales (*Spectrum Holes*), esto es, bandas de frecuencia asignadas a usuarios licenciados que no están siendo utilizadas y que, por tanto, podrían ser ocupadas por usuarios no licenciados (3) (ver Figura 3).

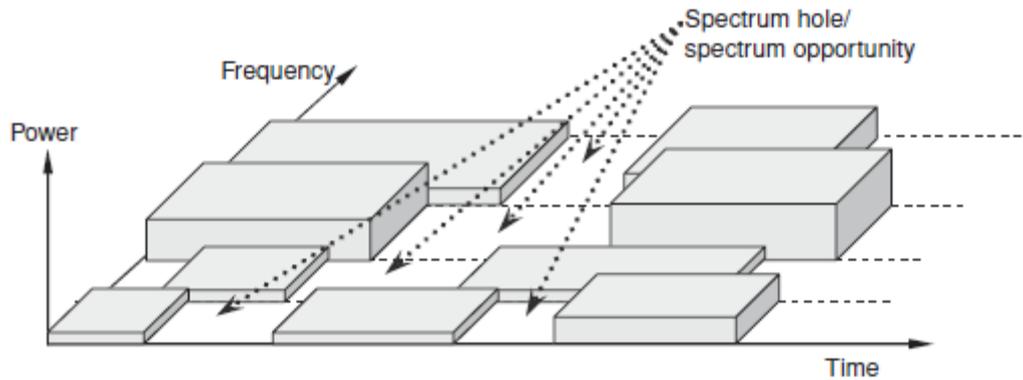


Figura 3: Spectrum hole

La meta principal de la radio cognitiva es por tanto proporcionar adaptabilidad a las transmisiones inalámbricas a través de acceso dinámico al espectro de forma que el rendimiento de la red sea optimizado.

Una de las principales características que han de tener estos dispositivos para cumplir esta tarea es la de ser sistemas configurables mediante software. Esto quiere decir que los distintos parámetros relativos a la transmisión de la señal (banda de frecuencia, tipo de modulación, y protocolo) han de poder ser controlados de forma dinámica, adaptándose en consecuencia a las condiciones del medio en tiempo real.

1.2.3.2 Arquitectura de radio cognitiva

La arquitectura de protocolos de radio cognitiva se puede ver en la siguiente imagen (ver Figura 4). En la capa física, la interfaz que se encarga de la comunicación con el medio se implementa mediante software. Los protocolos de adaptación en el resto de capas (MAC, red, transporte y aplicación) han de tener conocimiento de las distintas variaciones que pueda tener el entorno. En particular, los protocolos de adaptación deben considerar la actividad del tráfico de los usuarios primarios, los requisitos de la transmisión de los usuarios secundarios y las variaciones de la calidad del canal. Para enlazar todos los componentes, es necesario un sistema de control de radio cognitiva; dicho sistema utiliza algoritmos para obtener información de la señal a

través de la capa física para controlar los parámetros de transmisión de las distintas capas.

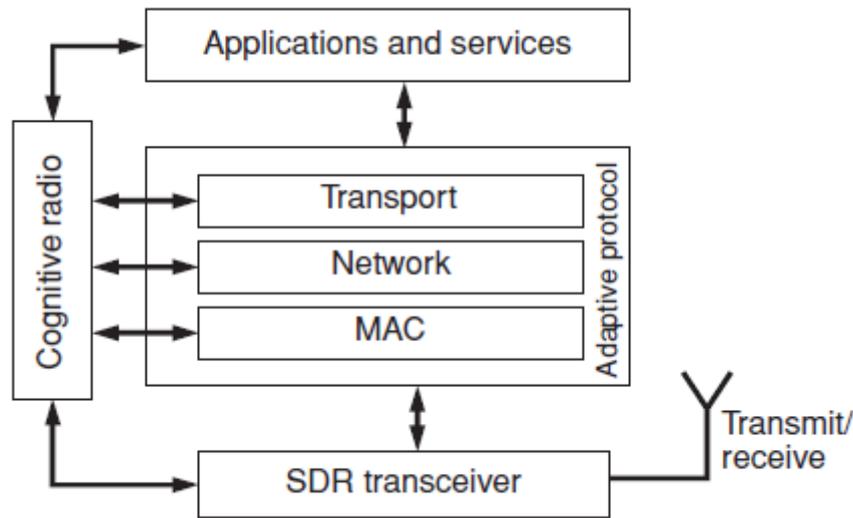


Figura 4: Pila de protocolos en radio cognitiva

1.2.3.3 Funciones de radio cognitiva

Las principales funciones que la radio cognitiva requiere para implementar un acceso al espectro eficiente son las siguientes (4):

- **Detección del espectro:** El objetivo es determinar el estado del espectro y la actividad de los usuarios licenciados midiendo la utilización de la banda de frecuencias que se desea utilizar. En particular, un transceptor detecta un ancho de banda que no está siendo usado (oportunidad espectral) y determina el método de acceso al mismo sin interferir con los usuarios licenciados.
- **Análisis del espectro:** La información obtenida en el punto anterior se utiliza para programar un acceso al espectro por parte de los usuarios no licenciados. En este caso los requisitos de la comunicación de los usuarios no licenciados se usan también para optimizar los parámetros de transmisión. Estos parámetros se optimizan basándose en un determinado objetivo establecido a priori (por ejemplo, maximizar el throughput de los usuarios sin licencia) y una serie de restricciones.

- **Acceso al espectro:** Una vez tomada la decisión acerca del método de acceso y los distintos parámetros existentes los usuarios sin licencia acceden a la banda de frecuencias seleccionada. Se realiza mediante un método de control de acceso MAC para radio cognitiva.
- **Movilidad del espectro:** La función de movilidad del espectro se refiere al cambio de la frecuencia de operación. Cuando un usuario licenciado accede a una banda que está siendo usada por un usuario no licenciado, el último podrá cambiar de banda.

1.2.3.4 Acceso dinámico al espectro

La radio cognitiva se refiere a un conjunto de tecnologías destinadas al incremento de la eficiencia en el uso del espectro frecuencial. Los sistemas de comunicaciones inalámbricas ofrecen un ancho de banda cada vez mayor a sus usuarios, por lo que la demanda del espectro se vuelve cada vez más grande. El espectro frecuencial es un bien escaso, y los distintos operadores que quieren acceder a él han de hacerlo mediante un esquema de licencias mediante el cual administradores públicos asignan bandas específicas a cada operador.

Actualmente, esta asignación se realiza de forma estática e inflexible en el sentido de que una banda licenciada sólo puede ser accedida por un operador y sus clientes (usuarios licenciados). Sin embargo, es conocido que mientras algunas bandas de frecuencia son muy usadas en ciertos puntos geográficos e instantes determinados, muchas otras son poco usadas (1). La consecuencia de esto es una situación paradójica: mientras que la escasez del espectro dificulta el desarrollo de nuevas aplicaciones inalámbricas, existen grandes porciones de espectro en desuso.

La radio cognitiva proporciona los mecanismos necesarios para permitir a usuarios sin licencia acceder al medio explotando las distintas oportunidades espectrales. Está basada en un sistema radio definido por software, lo que quiere decir que se trata de un sistema de comunicaciones inalámbricas capaz de ajustar dinámicamente los parámetros de transmisión (por ejemplo, la frecuencia de operación) el esquema de modulación, protocolo, etc.

Es crucial, además, que este tipo de acceso sea llevado a cabo con el menor impacto posible en el servicio proporcionado a los usuarios con licencia. Por tanto, los usuarios de este tipo de redes deben implementar algoritmos para detectar el uso espectral, identificar las oportunidades espectrales y decidir la mejor acción basada en el análisis.

Una vez que la decisión está tomada, los usuarios acceden al espectro de acuerdo con un protocolo de control de acceso al medio (*Medium Access Control MAC*), el cual permitirá la comunicación por parte de los usuarios sin licencia con una cantidad de colisiones mínima con otros usuarios conectados a la red.

El acceso dinámico al espectro, como se ha comentado anteriormente, es el mecanismo que controla el uso del espectro en respuesta a cambios del sistema (por ejemplo, canales disponibles o solicitudes de usuarios sin licencia) de acuerdo a ciertos objetivos. En este trabajo se trata el diseño de un protocolo de acceso al medio MAC para sistemas DSA centralizados. Se explorarán las posibilidades de un diseño formal basado en un proceso de decisión de Markov. Se estudiarán trabajos previos relativos a estos sistemas y se propondrá un marco de trabajo para llegar a un compromiso en el grado de servicio de las diferentes categorías de usuarios.

Cuando dos o más objetivos opuestos son balanceados en un problema de optimización, no existe una solución óptima en sentido estricto; se puede definir como frente de Pareto como un conjunto de valores, para cada objetivo individual, tales que no se puede mejorar cualquiera de los objetivos sin empeorar ninguno de los otros (ver Figura 5).

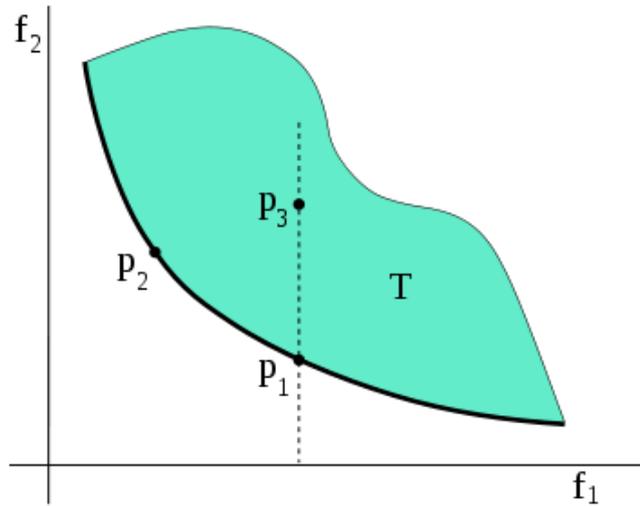


Figura 5: Frente de pareto genérico

En este trabajo estudiaremos las soluciones del frente de Pareto de forma que se concede prioridad a los usuarios con licencia. En este tipo de acceso, la política centralizada debe balancear las probabilidades de bloqueo de cada tipo de usuario.

1.2.3.5 Componentes de un sistema de radio cognitiva

Las principales funciones de un sistema de radio cognitiva pueden ser presentadas a través del concepto de “ciclo cognitivo” (5) (ver Figura 6).

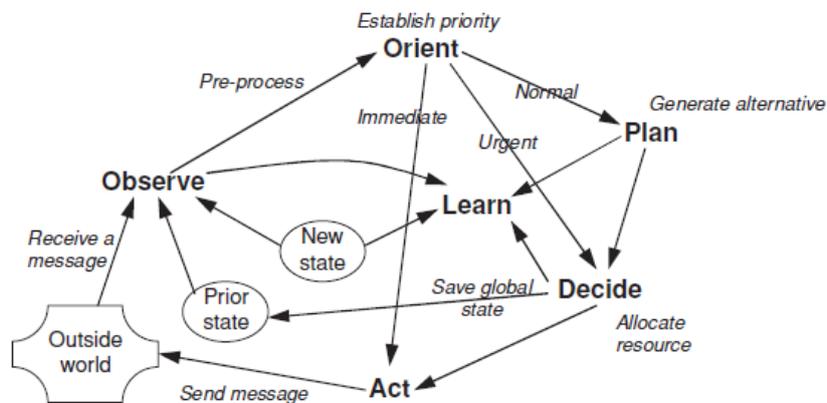


Figura 6: Ciclo cognitivo

Los diferentes componentes que se pueden encontrar en un transceptor de radio cognitiva se muestran en la figura siguiente (ver Figura 7).

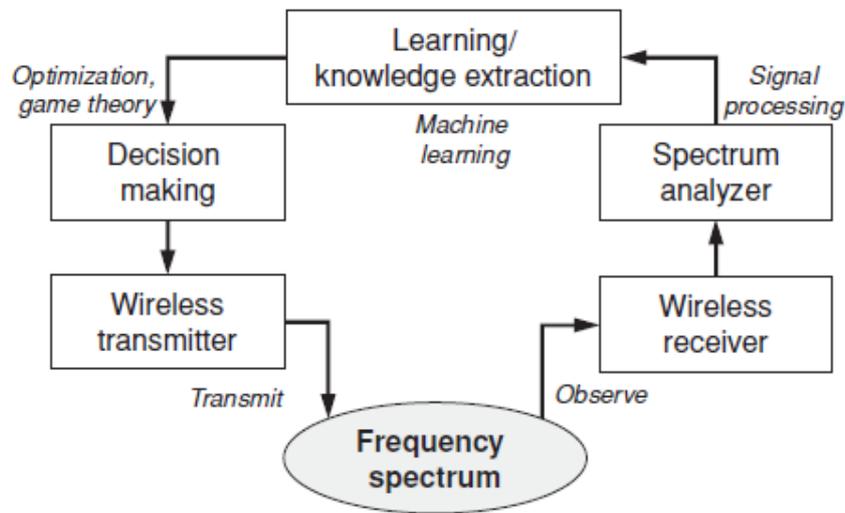


Figura 7: Componentes en un nodo de radio cognitiva

A continuación se expone una breve explicación de cada uno de ellos:

- **Transmisor/Receptor:** Se trata del componente más importante dentro de un nodo de radio cognitiva, y se encarga de la transmisión y recepción de información a través del medio radio. Además, el receptor se emplea para observar la actividad del espectro. Los parámetros de este componente pueden ser modificados de forma dinámica en función de las necesidades de protocolos de capas superiores.
- **Analizador de espectro:** Utiliza las señales capturadas para analizar la utilización del espectro (por ejemplo, para buscar oportunidades espectrales). El analizador de espectro asegura además que la transmisión de un usuario licenciado no es interferida si un usuario sin licencia decide acceder al canal.
- **Módulo de aprendizaje:** Este componente utiliza la información de la utilización del espectro para comprender el entorno RF (por ejemplo, el comportamiento de los usuarios licenciados). Este conocimiento extraído de los parámetros de la señal va mejorando con el tiempo, y se emplea para optimizar

y adaptar los parámetros de transmisión con el objetivo de conseguir el objetivo propuesto.

- **Módulo decisor:** Una vez se extrae información de la señal captada se ha de tomar la decisión de acceder al espectro o rechazar dicha posibilidad. La decisión óptima depende del entorno. Se pueden emplear diferentes técnicas para abordar este problema. Por ejemplo, la teoría de la optimización es válida cuando el sistema puede ser modelado como una única entidad y un único objetivo; en contraste, los modelos de la teoría de juegos son una buena aproximación cuando distintas entidades compiten por lograr un objetivo propio.

1.2.3.6 Potenciales aplicaciones de radio cognitiva

Esta tecnología tiene una gran cantidad de potenciales usos, tanto a nivel profesional como personal, entre los que se encuentran:

- **Redes inalámbricas de nueva generación:** Se espera que esta tecnología sea clave para el desarrollo de la próxima generación de redes inalámbricas heterogéneas. La radio cognitiva proporcionará cierto grado de inteligencia tanto a las aplicaciones de usuario como a las de los distintos proveedores para controlar la interfaz radio de forma eficiente. Por un lado, de cara a las aplicaciones de usuario, un dispositivo móvil podrá disponer de múltiples interfaces de forma simultánea (por ejemplo Wifi, WiMAX, etc) y observar el estado de las redes de acceso inalámbricas, decidiendo en consecuencia la red óptima a utilizar en cada momento. Por otro lado, los proveedores dispondrán de una herramienta para la optimización de la calidad de servicio proporcionada a un conjunto dado de usuarios, reduciendo la congestión de la red.
- **Coexistencia de diferentes tecnologías inalámbricas:** Nuevas tecnologías inalámbricas se encuentran en desarrollo (6). La radio cognitiva es una solución para garantizar la coexistencia entre las tecnologías actuales y las que aparecerán en el futuro.

- **Servicios sanitarios:** En la actualidad, varias tecnologías inalámbricas se aplican en distintos servicios sanitarios para mejorar la eficiencia del cuidado del paciente. Sin embargo, ciertas restricciones son impuestas; debido a que los equipos médicos son sensibles a interferencias electromagnéticas, la potencia de transmisión de los dispositivos inalámbricos ha de ser cuidadosamente controlada. El concepto de radio cognitiva puede ser aplicado a esta problemática.
- **Redes de emergencia:** La seguridad pública y las distintas redes de emergencia se pueden beneficiar también de esta tecnología para proporcionar una comunicación fiable y flexible haciendo uso de redes inalámbricas.
- **Redes militares:** Haciendo uso de radio cognitiva, los parámetros de las comunicaciones inalámbricas pueden ser adaptados de forma dinámica en función del instante, lugar y misión que se esté llevando a cabo.

1.3 Objetivo del estudio

En este Proyecto de Fin de Carrera se abordará el problema de la gestión del medio radio en un sistema de radio cognitiva donde encontramos dos tipos distintos de usuarios: usuarios licenciados (*Licensed Users*) y usuarios no licenciados (*Unlicensed Users*).

Se tratará de un estudio teórico, donde se emplearán distintas herramientas matemáticas para la definición del problema, se estudiará su utilización y finalmente se implementará mediante software. Un simulador programado en este entorno permitirá observar el comportamiento de este sistema de una forma detallada.

Como se ha mencionado anteriormente, distintas políticas son posibles a la hora de asignar una banda de frecuencias a un usuario no licenciado. En este proyecto se tratará de maximizar el *throughput* de los usuarios no licenciados, empleando como restricción un determinado *throughput* para los usuarios con licencia. De esta forma, se expondrán distintas gráficas y resultados relativos a una gran cantidad de

simulaciones para distintos escenarios, siendo de especial interés aquéllos que se asemejan a un sistema de comunicaciones móviles actual.

El proyecto se puede dividir en cinco partes bien diferenciadas:

- **Documentación:** Se analizarán las distintas herramientas y estudios realizados anteriormente que sirvan de punto de partida para la realización del estudio que nos ocupa.
- **Definición del problema:** Se definirá el problema desde un punto de vista matemático que nos permita analizarlo haciendo uso de herramientas informáticas.
- **Implementación del sistema:** Partiendo de la información de que se dispone y de la definición del problema se codificará en *Matlab* para el posterior análisis de resultados.
- **Validación de la solución:** Se implementará, también en *Matlab*, un simulador que permitirá verificar que la solución representa el comportamiento de un sistema real.
- **Obtención y análisis de resultados:** Haciendo uso de la implementación software se obtendrán una serie de gráficas y datos para un posterior análisis y extracción de conclusiones. Estos resultados se compararán además con los proporcionados por el simulador.

1.4 Propuesta de solución

En este estudio se propone abordar el problema de la gestión del medio radio de dos formas distintas.

La primera solución propuesta es la de emplear un proceso de decisión de *Markov* (*Markov Decision Process, MDP*) para la definición del problema. Es tipo de procesos están basados en las conocidas como cadenas de *Markov*; sin embargo, en este caso, una variable de control nos permite especificar el comportamiento del sistema, que será distinto dependiendo del estado en que nos encontremos.

Esta variable de control refleja el dinamismo del sistema ya que, programándolo adecuadamente, representará una respuesta adecuada en base a la situación el medio en un momento determinado. Dado que en este caso el objetivo es optimizar el *throughput* de los usuarios sin licencia restringiendo la utilización de los usuarios con licencia a una cantidad determinada, dicho parámetro dependerá principalmente del número de usuarios de cada tipo en un instante determinado. Este número quedará definido únicamente por el estado en que nos encontremos dentro de la cadena de *Markov*, teniendo por tanto una matriz bidimensional de estados para poder representar la cantidad de cada uno de los tipos.

La cadena de *Markov* estará definida en tiempo discreto, lo que significa que el cambio de estado se produce en unos instantes de tiempo determinados. Además, la variable que determina dichos cambios será una matriz de probabilidades de transición, en lugar de las tasas de llegada que tendríamos en un sistema real.

Lo que se hará será por tanto será convertir una cadena en tiempo continuo a otra cadena, en este caso discreta, asociada a la primera. Se trata de una aproximación válida que representa el sistema original, como veremos más adelante en detalle.

En la segunda solución el problema será modelado haciendo uso de programación lineal, lo que permitirá obtener de forma matemática la solución óptima en cada caso. La principal ventaja que aporta este método es que, mientras que haciendo uso de la solución anterior sólo son obtenidas políticas deterministas, en este caso también se contemplan aquéllas que no lo son; esto es, en este caso en lugar de decidir en función del número de usuarios de cada tipo en el sistema, las posibles decisiones son aleatorias, ponderadas de una forma concreta.

En ambos casos, una vez definido el sistema, será implementado haciendo uso de la herramienta *Matlab*, dada su gran facilidad a la hora de trabajar con matrices y gráficas.

1.6 Entorno de trabajo

1.6.1 Matlab

MATLAB (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) (7). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X. En este caso la totalidad de la implementación, tanto del modelo bajo estudio como de su simulador se llevarán a cabo bajo la plataforma Windows.

Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones: *Simulink* (plataforma de simulación multidominio) y *GUIDE* (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (*toolboxes*); y las de Simulink con los paquetes de bloques (*blocksets*).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

Debido a la facilidad del trabajo con matrices es la herramienta ideal para llevar a cabo este trabajo.

1.6.2 CVX

CVX es un sistema de modelación basado en MATLAB para optimización convexa (8). Se trata de una *toolbox* que convierte a este software en un lenguaje de modelación dedicado a la resolución de problemas de programación lineal, permitiendo introducir restricciones y funciones objetivo utilizando la sintaxis propia de MATLAB.

En su modo por defecto, CVX soporta una solución a los problemas de optimización convexa llamada programación convexa disciplinada (*disciplined convex programming*). Utilizando esta aproximación, las funciones convexas y conjuntos son construidos a partir de un limitado conjunto de reglas para el análisis convexo, comenzando por una librería base de conjuntos y funciones convexas. Las restricciones y objetivos que son expresados haciendo uso de estas reglas son automáticamente convertidos a forma canónica y resueltos.

CVX será empleado en este caso para resolver la aproximación del problema basada en programación lineal.

1.7 Enumeración del resto de apartados

En el próximo apartado, el número dos, se resumirán los objetivos de otros estudios relacionados con el concepto de radio cognitiva, así como las conclusiones a las que se llegaron con ellos.

En el apartado número tres será descrita la solución propuesta para el estudio en gran detalle; se analizará el problema matemáticamente y se mostrará el diseño del proceso de decisión de *Markov*, así como la implementación en *Matlab* de la solución y del simulador.

En el apartado número cuatro se podrán observar los resultados de las pruebas realizadas; se establecerán varios escenarios, y se probará cada uno de ellos variando distintos parámetros, se mostrarán gráficos ilustrativos y se explicará con detalle el transcurso de dichas pruebas así como sus resultados.

2. Trabajos relacionados

Son diversos los trabajos relacionados con este tipo de redes que han sido y siguen siendo desarrollados en estos momentos por distintos grupos de desarrollo e investigación; se mencionarán algunos interesantes.

2.1 CORVUS

CORVUS es una solución basada en radio cognitiva dirigida a crear y usar espectro virtual no licenciado de una forma que no se restringen los privilegios de los proveedores dueños de las licencias (9). En este apartado se discutirán las nociones básicas de dicha solución, así como la arquitectura y el funcionamiento básico de CORVUS.

2.1.1 Funcionamiento del sistema

Las premisas básicas de este sistema son las siguientes:

- Abundancia de espectro, el cual está disponible y es usado por los usuarios secundarios.
- Los usuarios secundarios utilizan técnicas de radio cognitiva para reducir o eliminar posibles interferencias con los usuarios primarios cuando éstos están presentes.

Los usuarios primarios no saben que un sistema de radio cognitiva está siendo empleado en un escenario particular; ningún tipo de información es intercambiada entre los usuarios primarios y los secundarios. Esto implica que los usuarios primarios no proporcionan señalización para acceder a su banda de frecuencia. Por otra parte, un usuario secundario es una entidad que quiere obtener acceso a un espectro en desuso perteneciente a los usuarios primarios.

En esta red heterogénea, los usuarios secundarios tienen un acceso restringido a la banda con licencia; pueden usarla, siempre y cuando no esté siendo usada en ese momento.

Un usuario primario PU_x puede tolerar una interferencia máxima de Δt_x unidades temporales. Nótese que esta interferencia temporal depende del sistema primario y puede ser diferente para distintos usuarios primarios. Tras la duración de dicha interferencia debe haber una banda frecuencial libre para que la comunicación sea posible, lo que quiere decir que todos los SU han de liberar las frecuencias que pertenecen a la banda antes de finalizar este periodo temporal. Incluso cuando un SU está usando la banda con licencia, el LU asume que su banda está libre y comenzará la transmisión sin informar al SU.

Es evidente que un requisito fundamental para los usuarios secundarios es monitorizar de forma efectiva la presencia de usuarios primarios (al menos cada Δt_x unidades temporales). La detección de LUs está basada en lo que se conoce como *Primary User Footprints (PUF)*, que se asumen disponibles en los usuarios secundarios. El PUF incluye información de la asignación espectral por parte de la FCC. Sin embargo, posee otras fuentes de información; por ejemplo, características locales de los usuarios primarios como los instantes de tiempo en los que la transferencia es máxima, entre otros datos.

En primer lugar, antes de comenzar cualquier comunicación un SU ha de buscar LUs para asegurar que la banda no está siendo usada. Además, un SU ha de medir de forma periódica el canal en las frecuencias que está usando y abandonarlas cuando un LU trate de acceder. Los usuarios secundarios deben ser capaces de organizar o reorganizar el uso del espectro para minimizar la pérdida de calidad de servicio.

En el modelo del sistema CORVUS, los usuarios secundarios forman grupos (*Secondary User Groups, SUG*) para coordinar sus comunicaciones. Los miembros de un SUG pueden comunicarse entre ellos en modo ad-hoc o, alternativamente, acceder a una infraestructura destinada a tal efecto a través de un punto de acceso. La comunicación entre miembros de distintos SUG, sin embargo, no es posible.

Sea cual sea su modo de funcionamiento se asume comunicación unicast. En ambos casos la organización de la comunicación puede ser distribuida o centralizada, con una estación específica actuando como líder. Los patrones de tráfico de los usuarios secundarios son parecidos a los de una red LAN inalámbrica y están compuestos principalmente por dos tipos de tráfico:

- Tráfico web, donde los usuarios secundarios están principalmente interesados en el acceso a internet. El tráfico web implica que ha de haber algún tipo de estación base proporcionando dicho servicio. Como consecuencia, este tipo de tráfico va atado generalmente a una infraestructura y se organiza de forma centralizada.
- Tráfico ad-hoc, que es todo aquel no soportado por una infraestructura. El propósito general es el de comunicar cada miembro del grupo. Se organiza de forma distribuida.

CORVUS opera en un amplio rango de frecuencias, desde decenas de MHz hasta varios GHz, creando lo que se conoce como banda virtual sin licencia (*Virtual Unlicensed Band*). Estos rangos amplios de frecuencia son usados por los SUGs, y pueden solaparse entre distintos grupos, dando lugar a una competición por la obtención del espectro.

Cada rango es dividido en n sub-canales. El tamaño de cada sub-canal ha de ser tal que un único sub-canal sea una pequeña parte de cualquier banda frecuencial definida en el espectro (ver Figura 8).

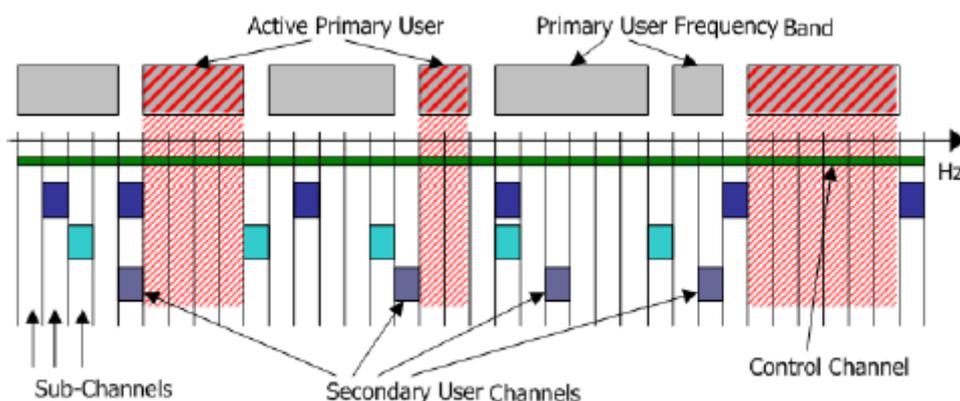


Figura 8: Ilustración del espectro en CORVUS

La figura anterior muestra esta idea. Los usuarios primarios poseen partes diferentes del espectro, pero podrían no estar siendo usadas en un momento determinado. Las bandas sombreadas en rojo indican que el LU está usando el espectro y, en consecuencia, esta banda no puede ser usada por un SU. La figura muestra tres comunicaciones de SUs diferentes. Para cada comunicación, una pareja de SUs elige un patrón de sub-canales para formar un enlace de usuario secundario (*Secondary User Link, SUL*). El número de sub-canales puede variar dependiendo de la calidad de los sub-canales, el ancho de banda de cada uno de ellos y los requisitos QoS de la conexión.

Los sub-canales seleccionados para crear el SUL deben ser escogidos fuera de cualquier banda frecuencial. Este principio tiene una doble finalidad. Por un lado limita el impacto de los SUs sobre los LUs. Por otra parte si un usuario primario aparece durante el tiempo de vida del enlace perjudicaría a uno o menos de los sub-canales empleados por el SUL. Los elementos que forman parte de la comunicación a través de ese enlace tendrían que liberar automáticamente ese sub-canal y empezar a buscar uno libre de nuevo.

Dentro de CORVUS, los SUs emplean canales lógicos dedicados para el intercambio de la información de control. Existen dos tipos de canales lógicos de control, los *Universal Control Channels (UCC)* y los *Group Control Channels (GCCs)*. Los canales UCC son únicos de forma global y han de ser conocidos por todos los usuarios secundarios. Su propósito principal es el de informar de los grupos existentes y permitir que nuevos usuarios se unan a un grupo. Adicionalmente, los SUs que quieran crear un nuevo canal pueden solicitarlo al PUF local.

Los canales de control llevan una carga limitada a una baja tasa de bits. Respecto a su localización, las posibilidades son:

- Espectro licenciado para este propósito.
- En una banda ISM.
- UWB (Ultra Wide Band).

2.1.2 Arquitectura del sistema

El sistema CORVUS sólo cubre las capas 1 (física) y 2 (de enlace) de la pila de protocolos ISO/OSI.

La siguiente figura muestra los principales bloques que construyen este sistema de radio cognitiva. Se pueden identificar seis funciones y dos canales de control que implementarán la principal funcionalidad del diseño.

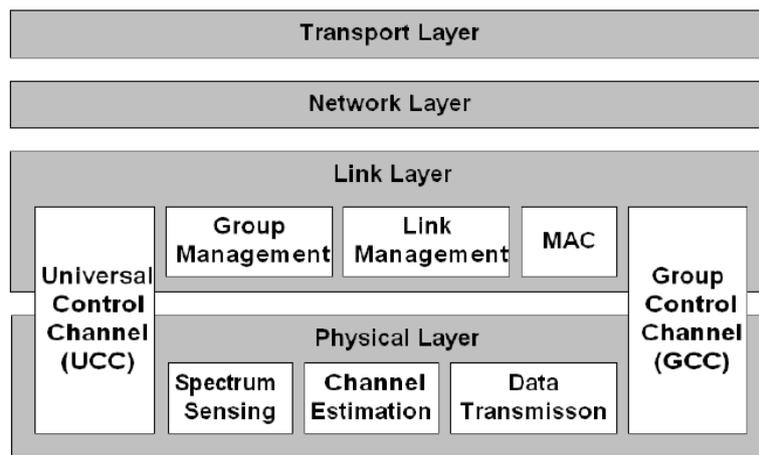


Figura 9: Pila de protocolos ISO/OSI para radio cognitiva

Las seis funciones se pueden situar en una de las dos capas (física o de enlace). Mientras que la capa física es responsable de la monitorización del espectro, la detección de usuarios primarios y la estimación de la calidad de los sub-canales, la capa de nivel de enlace gestiona los grupos y configura los enlaces.

Para finalizar se explica brevemente el objetivo de cada una de las partes que forman el sistema:

- **Spectrum Sensing:** Mide el espectro en sus distintas dimensiones (tiempo, espacio y frecuencia) para identificar sub-canales susceptibles de ser usados para una transmisión.
- **Channel Quality Estimation:** Se determina la calidad de los sub-canales. En base a estos resultados se definirán los parámetros de la transmisión.

- **Data Transmission:** Se encarga de la transmisión y, dado que es necesario que ésta sea flexible, en general el módulo será capaz de operar con distintas tasas, formatos de modulación, etc.
- **Group Management:** Permite a los nuevos usuarios obtener toda la información necesaria para unirse a un grupo específico. Adicionalmente se proporcionan los mecanismos necesarios para la creación de un nuevo grupo.
- **Link Management:** Se encarga de la configuración de un enlace, con el objetivo de hacer posible la comunicación entre dos usuarios secundarios. Además, mantiene activo el SUL durante toda la comunicación.
- **Medium Access Control:** Ha de proporcionar los mecanismos necesarios para permitir el acceso concurrente a un SUL por parte de varios usuarios secundarios o, en el peor caso, controlar el acceso concurrente de distintos sub-canales asociados a distintas conexiones de distintos usuarios secundarios.

2.2 DIMSUMNet

2.2.1 Funcionamiento de DIMSUMNet

Este sistema está basado en tres ideas principales.

El primero de ellos se conoce como banda de acceso coordinado (*Coordinated Access Band, CAB*). Se trata de un rango frecuencial reservado para las autoridades reguladoras (FCC) para el control del acceso dinámico. Múltiples partes del espectro frecuencial pueden ser empleadas como bandas de acceso coordinado (10).

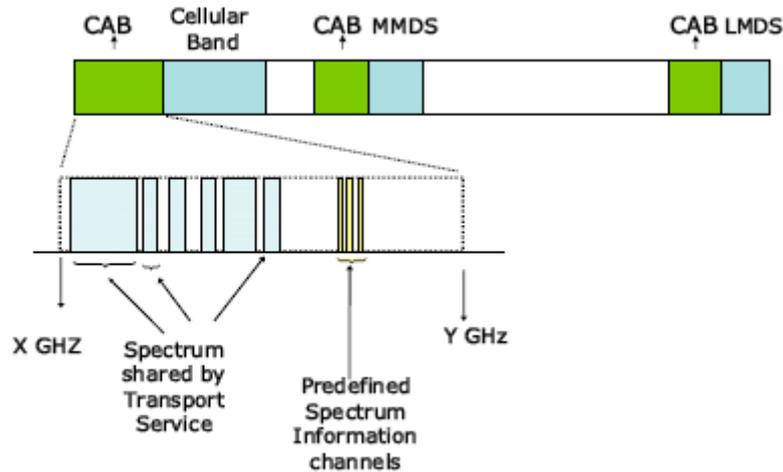


Figura 10: Banda de acceso coordinado.

Para una zona geográfica concreta, la asignación de distintas partes del espectro CAB a redes individuales o usuarios es controlado por lo que se conoce como *spectrum broker*, el cual posee la totalidad del tiempo el espectro CAB y lo proporciona bajo solicitud durante franjas temporales determinadas. Las condiciones para su cesión pueden incluir parámetros adicionales como, por ejemplo, una región espacial concreta, potencia máxima, etc. Se observa que la medición y verificación de que las condiciones son cumplidas es un reto, aunque es realizable haciendo uso de una solución centralizada.

Existen dos posibles modelos en el uso de la banda CAB. En el modelo más simple (CAB-M1), las solicitudes de espectro pueden ser generadas únicamente por las redes operadoras. En el modelo más complejo (CAB-M2), los distintos nodos (PDAs, portátiles, etc) participan en el proceso de obtención del espectro y por tanto lo solicitan para comunicarse con otros nodos o con las estaciones base.

Dentro de un CAB concreto, ciertas frecuencias son reservadas para los canales de información del espectro (*Spectrum Information, SPI*). En el caso de CAB-M1, los canales SPI son unidireccionales y van de la estación base al nodo, mientras que en el segundo modelo son bidireccionales.

El segundo concepto es el de multiplexación estadística del acceso al espectro en CAB (Statistical Multiplexing of Spectrum Access in CAB). Mientras que el concepto de CAB mejora el acceso al espectro, el concepto de multiplexación estadística está destinado a mejorar la utilización del espectro dentro del CAB.

La localización de las estaciones base tradicionales proporciona una equivalencia entre ancho de banda disponible y el área o densidad de usuarios que se desea cubrir. En general, se realiza un estudio de peor caso. La siguiente figura ilustra el uso del espectro en una localización concreta, donde se pueden observar distintas estaciones base correspondientes a dos proveedores de servicios.

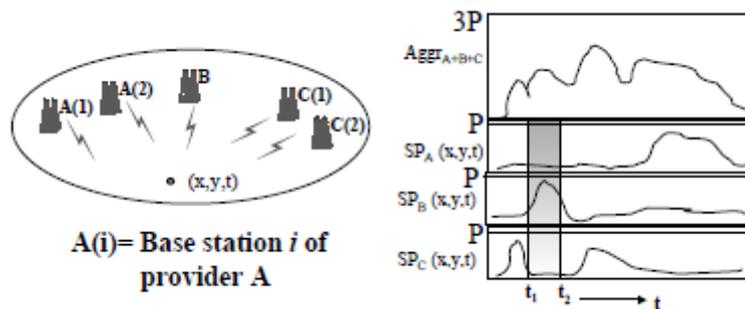


Figura 11: Utilización espectral en redes con múltiples proveedores.

Si consideramos un periodo de tiempo (t_1, t_2) la utilización espectral del proveedor B es máxima, mientras que los proveedores A y C usan una menor cantidad de espectro. En este caso la forma más eficiente de utilizar el espectro disponible es 1) tener un único proveedor usando todo el ancho de banda en una localización determinada o 2) tener una utilización espectral uniforme en un lugar determinado en un momento concreto.

El acrónimo DIMSUMNet viene del inglés, Dynamic Intelligent Management of Spectrum for Ubiquitous Mobile access network, y se trata de un sistema que implementa multiplexación estadística de acceso al espectro en una banda CAB. Emplea una red regional centralizada haciendo uso de un sistema de *brokering*, destinado a mejorar de forma significativa la utilización del espectro al mismo tiempo que reduce la complejidad y los requisitos del sistema.

2.2.2 Arquitectura de DIMSUMNet

La siguiente imagen muestra la arquitectura de este sistema.

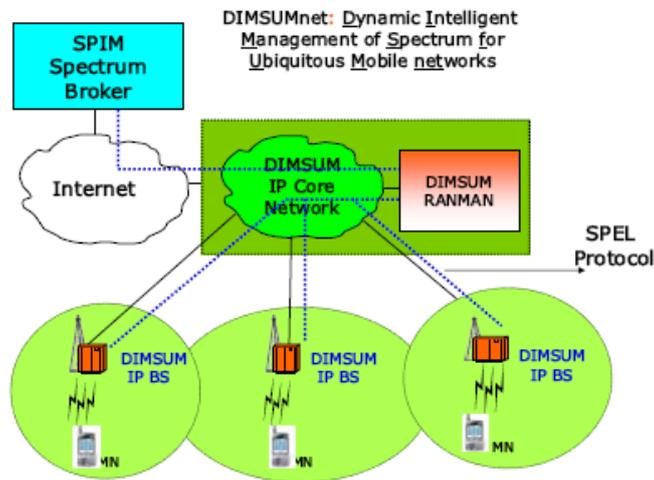


Figura 12: Arquitectura de DIMSUMnet

Los elementos principales son:

- SPIM Spectrum Broker.
- Radio Access Network (RAN).
- RAN Manager (RANMAN).
- Dispositivos de usuario inteligentes.

El servidor SPIM controla el acceso al espectro CAB. Gestiona las dimensiones del espectro (frecuencia, tiempo, espacio, señal y potencia).

Además, mantiene un mapa topográfico completo de la región donde está instalado, almacenando la información de las distintas estaciones base y la cobertura asociada a cada una de ellas.

En concreto, para cada celda, almacena:

- Espectro usado por cada canal SPI.
- Mapa de asignación de espectro (*Spectrum Allocation Map, SAM*).

En cuanto al sistema RANMAN, se trata de un nuevo elemento de la red que controla las distintas asignaciones del espectro en diferentes estaciones base. Tiene información de las características estáticas de las estaciones base (específicamente acerca de su software y hardware, por ejemplo el rango de frecuencias soportado, formas de modulación, etc). También conoce sus características dinámicas (carga actual, potencia, etc). Basándose en los requisitos de cada localización, las características de cada estación base y los requisitos de cobertura por parte del proveedor de servicios, estimará la cantidad de espectro requerido. Si el acceso es permitido envía información de control a las estaciones base para la activación de los canales radio.

En la siguiente figura se observa la configuración de un cliente y una estación base en un sistema DIMSUMnet.

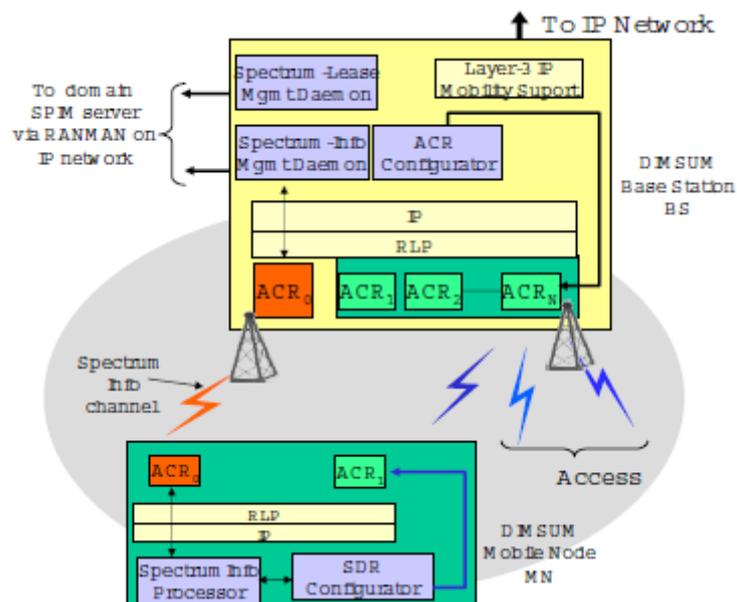


Figura 13: Arquitectura de un cliente y una estación base en DIMSUMnet.

2.3 DRiVE

2.3.1 Introducción

La Unión Europea fundó el proyecto DRiVE (*Dynamic Radio for IP Services in Vehicular Environments*), destinado al desarrollo de un servicio de alta eficiencia espectral para comunicaciones IP en un entorno heterogéneo para la transmisión de servicios multimedia entre vehículos (11).

Las características clave que ha de proporcionar son una alta eficiencia espectral y asignación dinámica de frecuencias dentro de distintas redes, así como servicios adaptativos en un entorno vehicular con un alto grado de movilidad.

La creciente demanda de servicios multimedia en entornos vehiculares, la penetración de distintas redes celulares y la creciente adaptación a las nuevas tecnologías y servicios de datos representan importantes retos para las comunicaciones móviles.

El proyecto DRiVE está siendo coordinado por Ericsson, el cual trabaja conjuntamente con empresas como BBC, Bosch, Chrysler, Nokia o Vodafone, entre otras. Trata de dar una solución a la convergencia celular y tecnologías broadcast para permitir transmisión de información de forma eficiente. Para conseguir este objetivo, el proyecto estudia la posible cooperación entre distintas tecnologías, como por ejemplo DVB-T y DAB, así como sistemas celulares como GSM, GPRS y UMTS en un rango de frecuencias común.

Como se ha mencionado, los principales problemas que DRiVE ha de afrontar son:

- Coexistencia de diferentes sistemas radio (GSM, GPRS, DAB, DVB-T) en un rango de frecuencias común haciendo uso de asignación dinámica de espectro.
- Cooperación entre distintos elementos de la red y aplicaciones de una forma adaptativa.

Estos objetivos requieren, principalmente, un profundo estudio de las siguientes áreas:

- Redes inalámbricas de acceso dinámico al espectro.
- Infraestructuras IP.

- Configuración Ad-hoc de distintos servicios.

La siguiente figura muestra la interacción entre estos tres bloques en el que este proyecto se centra.

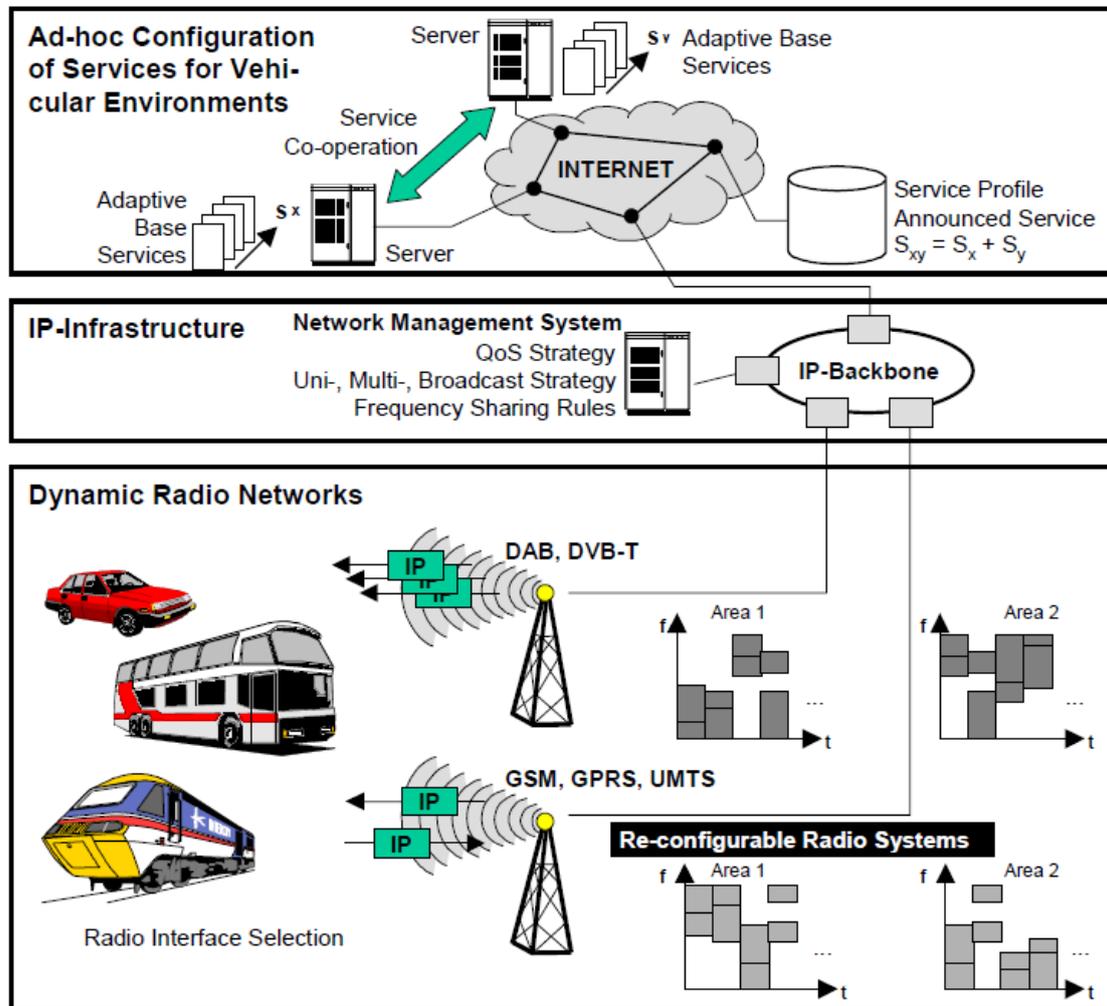


Figura 14: Arquitectura de un servicio multimedia en un entorno radio dinámico heterogéneo.

2.3.2 Arquitectura de DRiVE

Como se ha mencionado anteriormente el protocolo IPv6 juega un rol muy importante en este sistema. Este protocolo ofrece muchas ventajas en comparación con su predecesor, siendo un diseño más limpio, proporcionando soporte para sistemas móviles, soporte para distintos protocolos de seguridad y mejor direccionamiento.

La siguiente figura representa una vista general de algunas de las funciones del sistema DRiVE y su localización dentro del mismo. La arquitectura de red contiene dos partes principales, el núcleo y el bloque de acceso al sistema. El término *Radio Access System* (RAS) se refiere a toda infraestructura de red dentro de una tecnología concreta de las soportadas en DRiVE (GSM, GPRS, UMTS, DAB, DVB-T, WLAN).

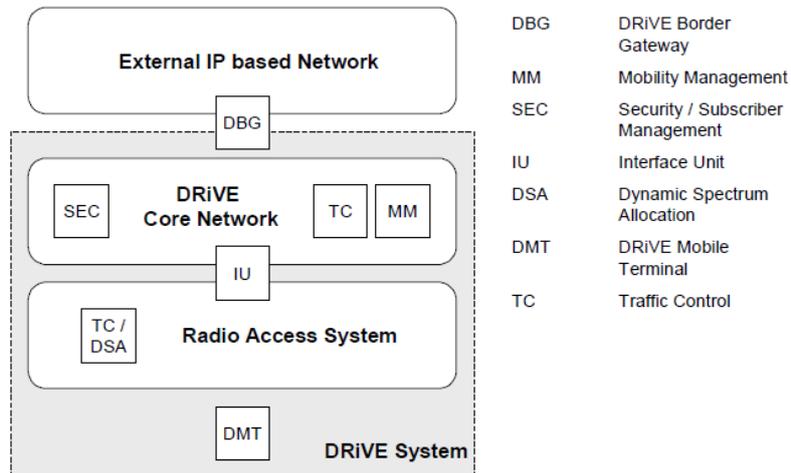


Figura 15: Arquitectura funcional de la red.

La tarea principal del núcleo de DRiVE es la de proporcionar a los terminales móviles una infraestructura de red para el acceso a distintos servicios, los cuales pueden estar localizados en una red externa (por ejemplo, internet) o en la red principal.

Los procesos de AAA (*Authentication, Authorization and Accounting*) suponen un importante reto para el desarrollo comercial del sistema DRiVE. Como parte del sistema de seguridad, el núcleo incorpora un servidor de autenticación para almacenar la información de los suscriptores y proporcionar dicha información a otras entidades del sistema.

En cuanto al sistema de acceso radio, DRiVE hace uso de una gran cantidad de tecnologías para su implementación.

Cada acceso al sistema ha de tener acceso al núcleo propiamente dicho, haciendo uso de una interfaz desarrollada para este fin (IU), proporcionando un nivel común de abstracción. El router tendrá que intercambiar datagramas IP entre el núcleo de la red

DRiVE y un DMT conectado a otro sistema de acceso IP (posiblemente desconocedor de la existencia de una red DRiVE). Es posible además el desarrollo de distintas interfaces por parte de distintos proveedores.

El sistema DSA se encarga de distribuir un conjunto disponible de recursos radio (canales) a un conjunto de transceptores de diferentes sistemas de acceso.

Comparado con un sistema fijo de asignación de espectro, DSA debería incrementar la eficiencia del uso espectral. Con DSA, los canales radio pueden ser asignados bajo demanda. Aunque DSA es el segundo punto más importante en un sistema DRiVE, muchos aspectos acerca de la interconexión entre TC y DSA siguen siendo discutidos actualmente.

Este sistema posee distintos sistemas de acceso, cada uno de ellos con diferentes posibilidades en términos de, por ejemplo, ancho de banda disponible o cobertura. Por tanto, cada sistema de acceso soportará distintos servicios. Un sistema podría sufrir de distintos problemas (por ejemplo, una calidad de servicio baja).

El sistema DRiVE permite la integración de diferentes sistemas de acceso con el propósito de proporcionar una amplia cantidad de servicios diferentes. En base a las condiciones del medio y del tipo de servicio, el sistema es capaz de seleccionar la plataforma más apropiada, mejorando así la eficiencia.

El control de tráfico es una de las claves del sistema. Es responsable de coordinar el proceso de distribución del tráfico y seleccionar el sistema de acceso que puede proporcionar la mejor calidad bajo las condiciones concretas del servicio solicitado.

El sistema de control de tráfico tiene por tanto la siguiente información en su entrada:

- Información relativa al terminal (características, localización, calidad de la señal recibida, etc).
- Preferencias de usuario (sistema prioritario de acceso, preferencias de coste, etc).
- Parámetros de tráfico (en general, requisitos de calidad de servicio).
- Estado de la red (carga, capacidad, etc).

3. Descripción de la solución

En esta sección se considerará el modelo elegido para la coordinación del acceso al espectro.

En este caso, los usuarios secundarios son aceptados o rechazados en concordancia a una política de admisión que sólo considera el impacto de la decisión en las probabilidades de bloqueo de los usuarios primarios.

Se define la política del sistema como el conjunto de controles que se aplican para todas las posibles combinaciones de ocupación de usuarios primarios y secundarios. Cada una de estas combinaciones se define como un estado del sistema y, por tanto, habrá un control para cada estado. Además existen dos grandes grupos de políticas: las estacionarias y las no estacionarias.

En una política estacionaria, existe una asociación única entre un estado y un control, es decir, en un estado genérico i -ésimo, siempre se utilizará el mismo control. Por otro lado, en una política no estacionaria, esta asociación no es tan estricta y, en un estado cualquiera, cada control tendrá asociada una probabilidad, de forma que en un mismo estado se podrán tomar distintos controles.

En este Proyecto la política que se buscará será de tipo estática, siendo el objetivo fundamental del mismo encontrar la política óptima, es decir, un mapeo control-estado tal que se obtenga el mejor compromiso entre los objetivos buscados (minimizar la probabilidad de bloqueo de los usuarios secundarios estableciendo como restricción una determinada probabilidad de bloqueo de los usuarios primarios), o lo que es lo mismo, se busca obtener el frente de Pareto.

La regla general es que los usuarios primarios son siempre aceptados si existen canales disponibles. Sin embargo, dependiendo del número de canales disponibles, el controlador puede denegar el acceso a los usuarios secundarios. Una vez que un usuario secundario ha ocupado un canal, es dicho usuario quien decide cuándo liberar el canal y no puede ser expulsado por el controlador.

Existen muchas formas de abordar este tipo de problemas. Una de ellas es la formulación de un MDP en el que el coste esperado se obtiene como una combinación lineal (dicho de forma más precisa, una combinación convexa) de las probabilidades de bloqueo de cada tipo de usuario. Ponderando los distintos factores es posible computar un frente de Pareto para ambas probabilidades de bloqueo, como ya se ha mencionado en la introducción.

Otra aproximación es la de calcular de forma exacta la política óptima haciendo uso de la programación lineal. Ambas aproximaciones se llevarán a cabo este trabajo, lo que nos permitirá compararlas y sacar conclusiones.

3.1 Modelado mediante un Proceso de Decisión de Markov

3.1.1 Cadenas de Markov

Una cadena de Markov es esencialmente un proceso estocástico, en el que en cada instante de tiempo, t , una variable aleatoria, X_t , tiene un valor entero aleatorio. La característica fundamental de las cadenas de Markov es que la distribución de probabilidad de la variable aleatoria en el instante siguiente X_{t+1} depende del valor de la variable en el instante actual, X_t .

Nos referimos al valor de la variable en cada momento como estado, existiendo una correspondencia entre el estado de la cadena de Markov y el estado del sistema que estamos modelando.

El rango de aplicación de este tipo de modelos incluye cualquier sistema dinámico cuya evolución en el tiempo implique aleatoriedad y podamos enumerar adecuadamente los estados que puede presentar el sistema. Esto convierte a las cadenas de Markov en una herramienta ideal para la definición del problema que estamos tratando en este trabajo.

Un caso particular de cadena de Markov son las cadenas de Markov en tiempo discreto (DTMC). En este caso, el estado cambia únicamente en estados discretos de tiempo que indexaremos mediante una variable entera denominada n . En cada periodo o etapa el estado del sistema se denota por X_n , que pertenece a un conjunto S de posibles estados denominado espacio de estados. En general asumiremos que S contiene un número de estados finito denominados por un número entero desde 1 hasta m , siendo m el número de estados, de la forma $S = \{1, 2, \dots, m\}$.

La cadena de Markov se describe mediante sus probabilidades de transición p_{ij} , definida como la probabilidad de que el sistema pase del estado i al estado j .

Se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$p_{ij} = P\{X_{n+1} = j | X_n = i\}, \quad i, j \in S$$

Una suposición clave en la definición de las DTMC es que las probabilidades de transición mencionadas se aplican siempre que el sistema pasa por el estado i , sin importar las transiciones ocurridas anteriormente. Dicho de otra forma, las probabilidades de transición únicamente dependen del estado en que se encuentra el sistema. Esta característica es conocida como propiedad de Markov, y se expresa de la siguiente forma:

$$P\{X_{n+1} = j | X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0\} = P\{X_{n+1} = j | X_n = i\} = p_{ij}$$

Para todos los instantes n y todos los estados $i, j \in S$, y todas las posibles secuencias de estados anteriores.

Las probabilidades de transición han de cumplir además dos propiedades:

- Ser no negativas
- Sumar uno

Lo que matemáticamente podemos expresar como:

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, \text{ para todo } i$$

Todos los elementos de una cadena de Markov quedan codificados en la matriz de probabilidades de transición, la cual nos muestra de forma organizada todas las posibles transiciones que puedan tener lugar en el modelo bajo estudio. De forma general, las filas representan el estado del que se parte, o estado i , y las columnas el estado al que se va, o estado j .

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{bmatrix}$$

Los grafos de transición de probabilidad nos permiten representar de forma gráfica las matrices de transición (ver Figura 16: Grafo de transición de probabilidad).

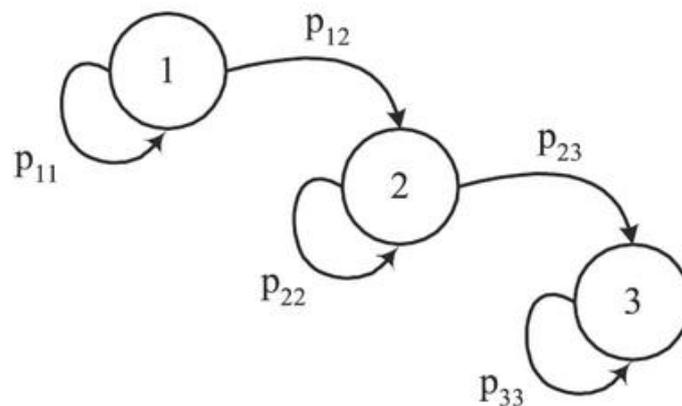


Figura 16: Grafo de transición de probabilidad

3.1.2 Procesos de decisión de Markov

Las cadenas de Markov y las técnicas aplicadas a las mismas son esencialmente descriptivas, es decir, nos permiten evaluar el rendimiento de un sistema que opera con unas normas de funcionamiento preestablecidas. Sin embargo, en muchas ocasiones, nuestro objetivo es precisamente diseñar las normas de funcionamiento de un sistema para que su rendimiento sea el mejor posible. En el ámbito de los sistemas de eventos discretos, esto implica que en cada etapa del sistema se puede actuar sobre alguna variable capaz de influir en la evolución futura del sistema, permitiendo un cierto grado de control sobre su rendimiento. En el caso de este trabajo, dicha variable de control influye en la posibilidad de que un usuario sin licencia acceda o no al sistema.

Si el sistema se modela mediante una cadena de Markov, la variable de control, denominada genéricamente como u , determinará las probabilidades de la matriz de transición. Tendremos por tanto una función $P(u)$, que devuelve una matriz de transición por cada valor de u . Tras cada transición hay que decidir qué valor debe tomar u en el estado en que nos encontramos (ver Figura 17).

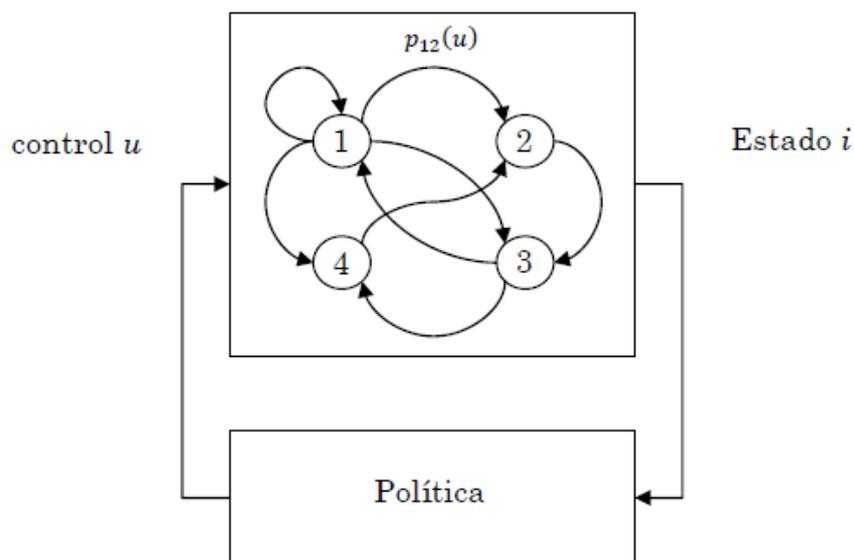


Figura 17: MDP

En los MDPs se deben asociar los estados (o las transiciones) a un determinado coste o beneficio. El problema abordado en un MDP consiste en encontrar el mejor valor posible de u (máximo beneficio o mínimo coste) para cada estado del sistema, lo que

se denomina política óptima. La mayor dificultad consiste en que se debe optimizar no sólo el rendimiento esperado en el estado en el que tomamos la decisión, sino también el rendimiento esperado en los futuros estados a los que llegamos como consecuencia de la decisión tomada.

La base de las técnicas que nos permiten encontrar la política óptima es la programación dinámica. Se trata de una extensa teoría que data de los años 60 y cuya importancia ha ido creciendo progresivamente en paralelo con la capacidad de cómputo de los ordenadores. Su aplicación en el ámbito de las comunicaciones también ha ido en aumento, desde que, a mediados de los 70, pioneros de la telemática como Dimitri Bertsekas (12) o Leonard Kleinrock (13) anticipasen su potencial para la ingeniería de protocolos.

Para ilustrar la gran utilidad de los métodos basados en MDP, a continuación se citan algunos casos de uso en el campo de las comunicaciones y en algunos otros:

- Asignación de recursos en transmisión inalámbrica, eficiencia energética, Calidad de Servicio, etc (14).
- Detección del espectro radio disponible en radio cognitiva (15)
- Control de admisión y enrutamiento en redes 802.16 (Wimax) (16)
- Control de admisión y asignación de recursos en servidores web (17)
- Ajuste dinámico de los precios de los servicios en redes en función de la congestión (18)
- Asignación de precios para *stock options* (19)
- Desarrollo de estrategias de inteligencia artificial para videojuegos (20)
- Desarrollo de algoritmos de soporte para el diagnóstico médico (21)

Son distintos los elementos que nos encontramos en un MDP.

Consideremos un sistema de estados discretos estocástico, del que asumimos que conocemos en todo momento su estado, es decir, su estado es observable, y cuyo espacio de estados S , es contable.

Un MDP es un sistema de este tipo en el que se definen tres elementos:

- Las acciones de control.
- Los costes asociados a dichas acciones.
- Transiciones entre estados y sus probabilidades de transición

Dado un estado $i \in S$ del sistema la acción de control u sobre ese estado se debe seleccionar de un conjunto finito de estados U , es decir $u \in U$. La regla que indica que acción de control debe ser seleccionada en cada etapa se denomina política. Las políticas que consideraremos en este trabajo tienen dos propiedades:

- No se seleccionan aleatoriamente
- La acción de control escogida en el estado i depende únicamente del estado i .

Este tipo de políticas se denominan políticas estacionarias. Una política estacionaria es un mapeo del espacio de estados S al conjunto de acciones de control posibles U , es decir, es una función de la forma $u = \mu(i)$, con $i \in S$. En muchas ocasiones sólo un subconjunto de las acciones de control de U están permitidas en el estado i . Dicho subconjunto, representado como U_i , contiene las acciones admisibles en i . Una política es admisible si $\mu(i) \in U_i$ para todo $i \in S$, algo que asumiremos siempre. El símbolo π representa generalmente cualquier tipo de política (estacionaria o no) y el símbolo μ suele emplearse para políticas estacionarias.

Una vez seleccionada la acción de control $\mu(i)$, la función de distribución de probabilidad del próximo estado queda configurada como $p_{ij}(\mu(i))$, para todo $j \in S$. Por tanto, una política μ determina toda la matriz de transición de la DTMC.

Otro elemento fundamental de las DTMC es que cada estado i se asocia con un coste (o beneficio) que depende, en general, de i y de la acción de control u . Se suele emplear la función $g(i, u)$ para representar dicho coste. En muchas ocasiones los costes (beneficios) se asocian a las transiciones entre estados. Representaremos este tipo de coste mediante la función $\tilde{g}(i, u, j)$ que proporciona el coste de usar u en i y pasar al estado j .

Dada esta función, emplearemos el coste esperado por estado, obtenido de la siguiente forma:

$$g(i, u) = \sum_{j \in S} p_{ij}(u) \tilde{g}(i, u, j)$$

El horizonte del problema es el número de etapas que se deben considerar en la resolución del problema. Por tanto, si el número etapas es N , para un determinado estado inicial $x_0 \in S$ se define el coste de una política π de la siguiente forma:

$$J_{\pi}(x_0) = E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \alpha^k g(x_k, u_k) \right\}$$

Donde representa el estado en la etapa $k = 0, 1, \dots, N - 1$, u es la decisión de control tomada a partir de la política π admisible aunque no necesariamente estacionaria y α es un escalar positivo tal que $0 < \alpha \leq 1$ denominado factor de descuento que se emplea en muchas ocasiones para reducir la importancia relativa de los costes/beneficios de futuras etapas frente a las etapas más inmediatas.

La operación $E\{*\}$ corresponde al cálculo del valor esperado, o esperanza matemática. El coste representado anteriormente corresponde a un problema de horizonte finito, en el que el coste total se define de la siguiente forma:

$$J_{\pi}(x_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \alpha^k g(x_k, u_k) \right\}$$

3.1.3 Modelo propuesto

Para la elaboración del modelo (como ya se ha mencionado, basado en un proceso de decisión de Markov) será necesario establecer los parámetros del sistema. A continuación se hace una breve descripción de los mismos:

- λ_{LU} : Se trata de la tasa de llegadas de los usuarios con licencia o usuarios primarios (*Licensed Users*). Se mide en llegadas por unidad de tiempo, que en este caso será segundos.
- λ_{SU} : Se trata de la tasa de llegadas de los usuarios sin licencia o usuarios secundarios (*Secondary Users*).
- μ_{LU} : Tasa de salidas de los usuarios primarios. De forma análoga a la tasa de llegadas, se mide en salidas por unidad de tiempo (segundos).
- μ_{SU} : Tasa de salidas de los usuarios secundarios.
- N : Representa el número de canales de que dispone el sistema.

El tráfico entrante se caracteriza como un modelo de Poisson clásico. Los usuarios con licencia llegan con una tasa λ_{LU} llegadas por unidad de tiempo. La tasa de llegada de los usuarios sin licencia se denota como λ_{SU} . Se asume que el espectro licenciado gestionado por el controlador central está dividido en canales (o bandas) con idéntico ancho de banda. Cada usuario, por tanto, ocupa un canal. El tiempo medio de ocupación del canal por los usuarios licenciados y los usuarios sin licencia viene determinado por $1/\mu_{LU}$ y $1/\mu_{SU}$ respectivamente, donde μ_{LU} y μ_{SU} determina la tasa de salida de cada clase.

Puesto que se está trabajando con un modelo de Poisson, el tiempo entre llegadas y el tiempo de ocupación del servidor (tiempo de servicio) son variables aleatorias distribuidas de forma exponencial en ambos casos. El modelo puede ser extendido fácilmente introduciendo nuevos tipos de usuario, probabilidad de que más de un canal sea ocupado por un usuario, etc.

En esencia el procedimiento es el mismo, pero la cadena de Markov estaría compuesta por más estados y características que las consideradas en este modelo. En este caso, el

estado de la cadena de Markov es dado por el número i de canales ocupados. Dado que el espectro es un recurso limitado, existe un número N finito de canales.

A partir de todos los parámetros mencionados se puede construir el modelo bajo estudio. El objetivo, como se ha mencionado en apartados anteriores, es el de obtener la política óptima, esto es, los valores de la variable de control u tales que se obtiene un valor determinado de rechazo de los usuarios secundarios estableciendo como restricción una determinada probabilidad de rechazo de los usuarios primarios. A partir de esta política óptima se puede obtener la matriz de probabilidades de transición del sistema asociado, su coste, y las probabilidades de rechazo de cada tipo de usuario.

El proceso por tanto consistirá en barrer una variable de ponderación α para obtener tantos puntos como sea posible del frente de Pareto. Además, esto se realizará para cada valor posible de u (en este caso 0 y 1).

A continuación se explicará el proceso que se ha de llevar a cabo para la obtención de la política óptima para cada valor de α .

El primer paso del proceso es el de mapeo existente entre el número de estado y el número de usuarios de cada tipo del sistema. El estado en que nos encontramos queda completamente definido por dicho número de usuarios. La siguiente tabla muestra un ejemplo donde $N = 2$.

Número de usuarios		Estado del sistema
Primarios	Secundarios	
0	0	1
1	0	2
2	0	3
0	1	4
1	1	5
0	2	6

Tabla 1: Mapeo entre el número de usuarios y el estado

Se puede obtener fácilmente la expresión para calcular el número de estados, de la siguiente forma:

$$N_{st} = \sum_{n=0}^N N + 1 - n = (N + 1)^2 - \frac{N(N + 1)}{2}$$

El siguiente paso será obtener las tasas, tanto de llegada como de salida, que se tienen en cada uno de los estados. Para su cálculo se parte de las tasas de llegada y salida totales λ_{LU} y λ_{SU} , y también del valor del parámetro u en cada caso. De esta forma se pueden establecer las siguientes condiciones:

- Si llega más de un usuario, la tasa es nula dado que este caso no se contempla (al ser un sistema discreto, se asume que un único movimiento de salida o entrada es posible).
- Si llega un usuario primario, la tasa será λ_{LU} .
- Si sale un usuario primario, la tasa será $N_{LU}(S) * \mu_{LU}$, siendo $N_{LU}(S)$ el número de usuarios primarios en el sistema en el estado S .
- Si llega un usuario secundario y $u = 1$, la tasa será λ_{SU} . En caso contrario la tasa será nula, pues no se deja acceder a dicho usuario.
- Si sale un usuario secundario, la tasa será $N_{SU}(S) * \mu_{SU}$, siendo $N_{SU}(S)$ el número de usuarios secundarios en el sistema en el estado S .

De esta forma tendremos completamente definida la cadena de Markov asociada. A continuación, y siguiendo con el ejemplo expuesto anteriormente, donde $N = 2$, se obtiene la siguiente representación una vez obtenidas las tasas (ver Figura 18).

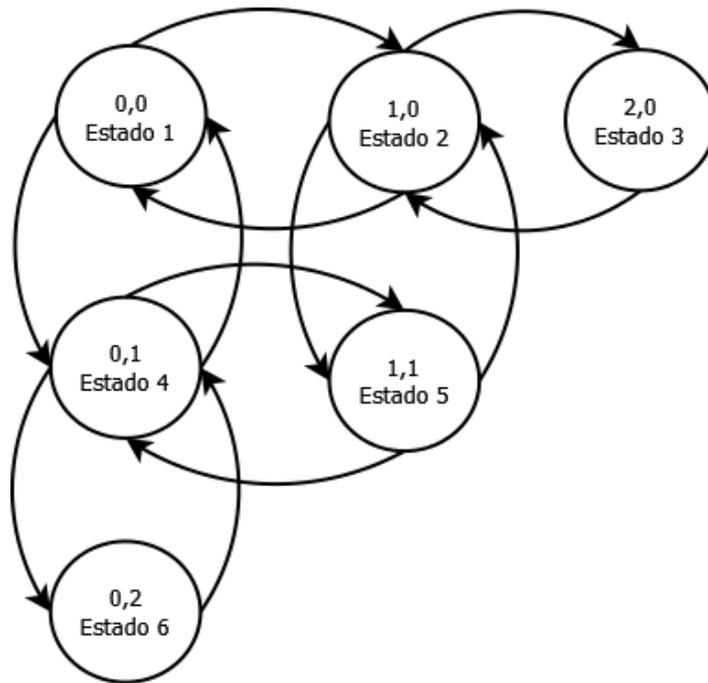


Figura 18: Cadena de Markov asociada a un sistema de dos canales

Como se puede observar en la figura, existe la restricción de que sólo un usuario de un tipo determinado puede entrar o salir en una transición (el resto de transiciones no existen o, lo que es lo mismo, la probabilidad de que ocurran es nula).

El modelo descrito anteriormente consiste en una cadena de Markov en tiempo continuo. En el marco de los MDPs han de ser definidas las acciones y los costes de dichas acciones.

Denotamos como $g(i, u)$ el coste instantáneo de decidir la acción u en el estado i . En el sistema considerado la acción u se define como se muestra en la Tabla 2

Variable de control (u)	Decisión
1	Se acepta al usuario secundario
0	No se acepta al usuario secundario

Tabla 2: Valores de la variable de control

Como se puede observar la tabla anterior se refiere únicamente a los usuarios secundarios. Se asume que los usuarios con licencia son aceptados en todo momento salvo cuando todos los canales están ocupados.

La función $g(i, u)$ es dada por la combinación convexa de dos funciones de coste por etapa, $g(i, u) = \alpha g_{LU}(i, u) + (1 - \alpha)g_{SU}(i, u)$, donde:

$$g_{LU}(i, u) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = N \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

$$g_{SU}(i, u) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = N \\ u & \text{otro caso} \end{cases}$$

Estas funciones denotan las probabilidades de bloqueo por unidad de tiempo para cada clase de usuario. Nótese que las probabilidades de bloqueo están definidas como la probabilidad de que el sistema no proporcione un canal al usuario que lo solicita. El objetivo es encontrar una política tal que, para una cierta importancia relativa dada a cada tipo de coste (determinado por α), el valor medio del coste combinado esperado sea minimizado.

La función para minimizar dicho valor es la siguiente:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{E\{t_K\}} E \left\{ \int_0^{t_K} g(x(t), u(t)) dt \right\}$$

Donde t_K es el tiempo de finalización de la transición K-ésima.

El problema puede ser resuelto formulando su problema en tiempo discreto asociado. Siendo γ un escalar mayor que la tasa de transición en cualquier estado de la cadena de Markov (por ejemplo, $\gamma > v_i(u)$), podemos calcular las probabilidades de transición $\tilde{p}_{i,j}(u)$ para el problema en tiempo discreto a partir de las probabilidades $p_{i,j}(u)$ del problema original como sigue:

$$\tilde{p}_{i,j}(u) = \begin{cases} \frac{v_i(u)}{\gamma} p_{i,j}(u) & \text{si } i \neq j \\ 1 - \frac{v_i(u)}{\gamma} & \text{si } i = j \end{cases}$$

Donde es conocido (12) que si λ y h satisfacen:

$$\tilde{h}(i) = \min_{u \in \{0,1\}} \left[g(i, u) - \lambda + \sum_{j=1}^N \tilde{p}_{i,j}(l) \tilde{h}(j) \right] \quad i = 1, \dots, n$$

Entonces λ y el vector h con componentes $h(i) = \gamma \tilde{h}(i)$ solucionan el problema original. Se sabe además que la estructura de este problema, en esencia un problema de control de admisión, requiere una solución umbral en la que los usuarios sin licencia que llegan a la red sólo serán admitidos si el número ocupado de canales está por debajo de dicho umbral.

De esta forma ya se han obtenido los siguientes elementos, para cada valor de la variable de control u :

- Matriz de probabilidades de transición
- El valor del vector de costes asociado a los usuarios primarios $g_{LU}(i, u)$
- El valor del vector de costes asociado a los usuarios secundarios $g_{SU}(i, u)$
- El valor de la combinación convexa de las dos funciones de coste por etapa $g(i, u)$

A partir de dichos elementos se puede construir una matriz de transición asociada a la política óptima, que como se ha comentado es aquella que balancea de forma adecuada las probabilidades de rechazo de ambos tipos de usuario.

El siguiente paso es por tanto obtener la política óptima haciendo uso del concepto de programación dinámica. Para realizar esta tarea se hará uso del algoritmo *Policy Iteration*.

El algoritmo *Policy Iteration* consiste en generar una secuencia de políticas estacionarias, cada una con un coste mejorado respecto a la política precedente. Iterando de esta forma se consigue llegar a la óptima cuando la política obtenida no mejora en la siguiente iteración.

Los pasos para aplicar este método son los siguientes:

1. Inicialización: Escoger una política estacionaria inicial μ^0 .
2. Evaluación de la política: Dada una política estacionaria μ^k , computar su función de coste correspondiente, J_{μ^k} resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$(1 - \alpha P_{\mu^k})J_{\mu^k} = g_{\mu^k}$$

3. Mejora de la política: Obtener una nueva política estacionaria mediante la expresión siguiente:

$$\mu^{k+1}(i) = \arg \min_{u \in U_i} \left[g(i, u) + \alpha \sum_{j \in S} p_{i,j}(u) J_{\mu^k}(j) \right] \quad i = 1, \dots, n$$

Puesto que el número de políticas estacionarias es finito, ya que los conjuntos S y U son finitos, y se genera una política distinta y mejorada en cada iteración, se sabe que el algoritmo alcanzará una política óptima en un número finito de iteraciones.

Sin embargo hay un inconveniente, que en cada iteración hay que resolver un sistema lineal de ecuaciones. Si el sistema tiene muchos estados, esta operación ralentiza mucho cada iteración, haciendo el método menos interesante.

En muchos casos se puede estudiar la estructura del problema planteado y caracterizar las políticas óptimas, lo que puede acelerar la convergencia de *policy iteration*. Por ejemplo, en ocasiones podemos demostrar, antes de disponer de la solución numérica

del problema, que las políticas óptimas pertenecen a un determinado subconjunto dentro de conjunto de políticas admisibles, lo que nos permite restringir la búsqueda a las políticas de dicho subconjunto.

Haciendo uso de este algoritmo se obtiene la política óptima asociada al valor de α deseado, y se puede por tanto barrer todo el espacio para dibujar el frente de Pareto.

3.2 Modelado mediante un Proceso de Decisión de Markov con restricciones

3.2.1 Concepto de programación lineal y algoritmo simplex

La programación lineal (*Linear Programming, LP*), es el problema de la maximización o minimización de una función lineal sobre un poliedro convexo. La programación lineal es una teoría matemática muy extendida en distintos campos de la ingeniería.

Se puede abordar un problema de programación lineal haciendo uso de distintos métodos, entre los que se encuentra el método simplex (22) (23), el cual se mueve a lo largo de los filamentos de un politopo para encontrar la mejor respuesta posible al problema. Existen sin embargo otros algoritmos de los que también se hablará brevemente en este apartado.

Un problema de programación lineal se puede expresar de forma estándar como sigue:

$$\min c^T x$$
$$\text{Sujeto a: } \begin{cases} Ax = b \\ x \geq 0 \end{cases}$$

Donde x es el vector de variables a resolver, A es la matriz de coeficientes conocidos y c y b son vectores de coeficientes conocidos. La expresión $c^T x$ es conocida como función objetivo, y las ecuaciones $Ax = b$ son conocidas como restricciones. La matriz A es generalmente no cuadrada y además tiene normalmente más columnas que filas. Por tanto, la ecuación $Ax = b$ es normalmente indeterminada, dejando una gran amplitud en la elección del valor de x que minimiza $c^T x$.

Existen dos familias de técnicas dedicadas a resolver este tipo de problemas ampliamente utilizadas hoy en día. Ambas funcionan de forma similar, recorriendo de forma progresiva una serie de soluciones posibles hasta que se encuentra una que satisface las condiciones de forma óptima.

Estos métodos son los siguientes:

- Los métodos simplex, introducidos por Dantzig hace alrededor de 50 años, recorren soluciones “básicas” calculadas a partir de fijar ciertas variables a sus valores extremos para reducir la matriz de restricciones $Ax = b$ a un sistema cuadrado, el cual puede ser resuelto para unos valores determinados del resto de variables que no han sido fijadas. Las soluciones básicas representan puntos de los extremos de la región de posibles valores definidos por $Ax = b, x \geq 0$, y por tanto el método simplex puede ser visto como un desplazamiento desde un punto a otro dentro del filo de dichos extremos.
- Los métodos de punto interior y de barrera, que barren sucesivamente puntos del interior de la región de posibles soluciones, en lugar de moverse por el borde. Estos métodos derivan de técnicas para problemas no lineales que fueron desarrollados y popularizados en los años 60 por Fiacco y McCormick, pero su aplicación a problemas lineales no se dio hasta 1984.

La solución a un problema de programación lineal se encuentra dentro de los límites de la región de valores posibles según el siguiente teorema:

Si un problema de LP tiene solución óptima, esta se encuentra en uno de los puntos extremo o en una de las líneas que una dos puntos extremo adyacentes de la región de factibilidad.

Este teorema implica que un número finito de puntos extremos deriva en un número finito de soluciones. Por tanto, la búsqueda es reducida a un conjunto finito de puntos. Sin embargo, un conjunto finito puede ser demasiado grande para problemas prácticos. El método simplex proporciona una forma eficiente que garantiza la convergencia en un número finito de pasos.

Los problemas de LP deben ser convertidos a forma aumentada antes de ser resueltos por el algoritmo simplex. Esta forma de representar el problema introduce variables *débiles* no negativas para reemplazar las desigualdades encontradas en las restricciones por igualdades. Una vez realizado este proceso el problema puede ser escrito como sigue:

$$\begin{pmatrix} 1 & -c^T & 0 \\ 0 & A & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z \\ x \\ x_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix}$$

Donde x es el vector de variables escrito en forma estándar como se ha mencionado anteriormente. x_s es el vector de variables débiles introducido a partir del proceso de aumento, c contiene los coeficientes de optimización, A y b describen el sistema de ecuaciones de restricciones, y Z es la variable que se desea maximizar.

Generalmente, el número de variables excede el número de ecuaciones. La diferencia entre el número de variables y el número de ecuaciones nos da el número de grados de libertad asociado al problema. Cualquier solución, ya sea óptima o no, incluirá un número de variables de valor arbitrario. El algoritmo simplex emplea el cero como este valor arbitrario, y el número de variables con valor nulo es por tanto igual al número de grados de libertad del problema.

Las variables que contienen un valor distinto de cero son llamadas variables básicas, y las variables con valor nulo son llamadas variables no básicas en el algoritmo simplex. La forma aumentada de representación simplifica la búsqueda del valor básico inicial dentro del conjunto de soluciones posibles.

El algoritmo simplex consta de los siguientes pasos:

1. Comienza la búsqueda de la solución en un punto extremo.
2. Determina si el movimiento a un extremo adyacente mejora la optimización de la función objetivo. Si esto no ocurre, la solución actual es la óptima. Si la solución se puede mejorar se sigue con el siguiente paso.

3. Se desplaza al punto del extremo adyacente que ofrece la mayor mejora posible de la función objetivo.
4. Se repiten los pasos 2 y 3 hasta que se encuentra la solución óptima o se descubre que el problema no tiene solución posible.

En 1972, Klee y Minty dieron un ejemplo de un problema lineal en el que el politopo P es una distorsión de un cubo n -dimensional. Mostraron que el método simplex, tal y como había sido formulado por Dantzig, recorría los $2n$ vértices antes de llegar a la solución óptima. Este hecho demuestra que, en el peor caso, el algoritmo tiene una complejidad exponencial. Ejemplos similares han sido encontrados posteriormente. A pesar de esto, el algoritmo simplex es considerablemente eficiente en la práctica.

La importancia de la programación lineal deriva en parte de la gran cantidad de aplicaciones, y también de la existencia de buenas soluciones de propósito general para encontrar soluciones óptimas.

Por otra parte, existen algunas limitaciones en la programación lineal. En la práctica, la función objetivo y las restricciones son raramente lineales. Bajo condiciones de no linealidad, podrían existir numerosos óptimos locales, derivando en una mala solución por parte del algoritmo simplex.

3.2.2 Modelo propuesto

Dadas las definiciones anteriormente expuestas, son tres los elementos que han de identificarse en el problema que nos ocupa:

- Variables del sistema
- Función objetivo, que depende de las variables
- Restricciones impuestas

De esta forma se buscarán los valores de las variables que optimizan (minimizan) la función objetivo, de forma que se satisfagan las restricciones.

En primer lugar se define $b_s(i, u)$ como el valor del coste (probabilidad de bloqueo de los usuarios secundarios) de estar en el estado i cuando se aplica el control u . De forma análoga, $\phi(i, u)$ es el valor de ponderación asociado a cada estado y control; es además, por tanto, el conjunto de variables del sistema.

De esta forma, la función objetivo que se desea minimizar es la siguiente:

$$\min_{\phi} \sum_{i \in S} \sum_{u \in U} b_s(i, u_j) \phi(i, u)$$

Será condición necesaria, como sabemos, que la probabilidad de bloqueo de los usuarios primarios no exceda de un determinado valor. Podemos representar matemáticamente esta restricción de la siguiente forma:

$$\sum_{i \in S} \sum_{u \in U} b_s(i, u_j) \phi(i, u) \leq \beta$$

Donde β es el valor máximo de probabilidad de bloqueo que se desea tolerar.

Dada la definición de $\phi(i, u)$ anteriormente expuesta, se ha de tener en cuenta que, al ser un factor que pondera los costes asociados a cada estado y valor de la variable de control, la suma de todos los valores de $\phi(i, u)$ asociados a un estado en concreto ha de ser igual al producto de dichos valores por las probabilidades de transición $P_{ji}(u)$. Expresado matemáticamente, se traduce en la siguiente fórmula:

$$\sum_{u \in U} \phi(i, u) - \sum_{i \in S} \sum_{u \in U} P_{ji}(u) \phi(i, u) = 0 \quad \forall j \in S$$

Otra restricción es que la suma de todos los valores que contiene ϕ sea la unidad, dado que ha de ponderar los costes de cada estado y variable de control.

Esta restricción queda representada como sigue:

$$\sum_{i \in S} \sum_{u \in U} \phi(i, u) = 1$$

Por último, las variables del sistema han de ser valores positivos:

$$\phi(i, u) \geq 0$$

Para poder resolver el problema de programación lineal haciendo uso de MATLAB será necesario redefinir las ecuaciones anteriores a partir de vectores.

Definimos $r(i, u_j)$ como el coste (probabilidad de bloqueo de los usuarios secundarios) asociado al estado i cuando se aplica el control u_j y \bar{r} como el vector que contiene todos los costes asociados a cada estado y a cada control. Si suponemos un sistema con dos estados, \bar{r} quedaría definido de la siguiente forma:

$$\bar{r} = [r(1, u_1) \quad r(2, u_1) \quad r(1, u_2) \quad r(2, u_2)]$$

La función objetivo será:

$$f(\phi) = \bar{r} * \phi'$$

Donde ϕ es un vector que pondera los valores de coste asociados a cada estado y control.

Si definimos \bar{c} como el vector que contiene las probabilidades de error de los usuarios primarios, la primera de las restricciones será:

$$\bar{c} * \phi' \leq \beta$$

En cuanto a las restricciones equivalentes que permiten obtener un valor de ϕ válido:

$$\sum_{\substack{i=j \\ u \in U}} \phi(i, u) - P(j)\phi = 0$$

$$\sum_{\substack{i \in S \\ u \in U}} \phi(i, u) = 1$$

$$\phi \geq 0$$

A la hora de obtener la matriz de transiciones, dado que lo que se ha de hacer es ponderar de algún modo las matrices de probabilidades de transición para cada valor de la variable de control en función de los valores de ϕ obtenidos, el siguiente paso será obtener el peso relativo de cada valor. Se puede calcular haciendo uso de la siguiente expresión:

$$q_{\mu}(i, u) = \frac{\phi(i, u)}{\sum_{u \in U} \phi(i, u)}$$

De esta forma, se puede obtener cada valor de la matriz de probabilidades de transición $P(i, j)$ como:

$$P(i, j) = P_{u=1}(i, j) * q_{\mu}(i, u = 1) + P_{u=2}(i, j) * q_{\mu}(i, u = 2)$$

Donde $P_{u=1}(i, j)$ y $P_{u=2}(i, j)$ son las matrices de probabilidades de transición asociadas a la utilización del control de tipo 1 y 2 respectivamente.

De forma análoga, se obtienen finalmente los costes asociados a la utilización de la matriz resultante:

$$g_{LU}(i) = g_{LU}(i, u = 1) * q_{\mu}(i, u = 1) + g_{LU}(i, u = 2) * q_{\mu}(i, u = 2)$$

$$g_{SU}(i) = g_{SU}(i, u = 1) * q_{\mu}(i, u = 1) + g_{SU}(i, u = 2) * q_{\mu}(i, u = 2)$$

3.3 Implementación del simulador

La intención a la hora de la elaboración de un simulador en este trabajo es la de validar de forma adecuada los resultados obtenidos una vez las pruebas sean realizadas. Hasta ahora se ha desarrollado el modelo a partir de dos aproximaciones y se han obtenido las políticas óptimas asociadas a cada problema en particular. Sin embargo, estos dos modelos deben de ser fieles a la realidad.

Con el simulador, por tanto, debe llegarse a las siguientes conclusiones:

- Las probabilidades de bloqueo de cada tipo de usuario en el frente de Pareto (políticas óptimas para cada valor de α) deben coincidir con las del simulador, cuando el mismo funciona bajo las condiciones impuestas por una política óptima. Esto implica que el modelo se ajusta a la realidad.
- No existen otras políticas, distintas de la óptima, que mejoren la función objetivo estando sujeto a las restricciones. Esto implica que la política obtenida es, efectivamente, la óptima, para cada valor de α .

Como ya se ha mencionado, la implementación se llevará a cabo en MATLAB. Se explicará sin embargo su implementación desde un punto de vista teórico y se mostrará un diagrama de flujo asociado a su comportamiento, sin entrar en las particularidades del código.

Los elementos de entrada al simulador, de forma análoga a lo que se ha hecho durante la definición del modelo, son los siguientes:

- λ_{LU} : Tasa de llegadas de los usuarios con licencia o usuarios primarios.
- λ_{SU} : Tasa de llegadas de los usuarios sin licencia o usuarios secundarios.

- μ_{LU} : Tasa de salidas de los usuarios primarios.
- μ_{SU} : Tasa de salidas de los usuarios secundarios.
- N : Número de canales de que dispone el sistema.
- α : Parámetro de ponderación.
- **Iteraciones**: Parámetro que determina la precisión de la simulación. Conforme el número de eventos que tienen lugar crece, el resultado representa de mejor forma el sistema real.

Para que el simulador pueda obtener de forma correcta las probabilidades de bloqueo de cada tipo de usuario, se requerirá llevar un registro de la siguiente información con la ocurrencia de cada evento:

- N_{LU} : Número de usuarios licenciados en el sistema.
- N_{SU} : Número de usuarios sin licencia en el sistema.
- L_{LU} : Número de llegadas de usuarios licenciados ocurridas durante la simulación.
- L_{SU} : Número de llegadas de usuarios sin licencia ocurridas durante la simulación.
- B_{LU} : Número de usuarios licenciados rechazados.
- B_{SU} : Número de usuarios sin licencia rechazados.

De esta forma, el simulador seguirá un proceso iterativo donde llegadas de cada tipo de usuario tienen lugar siguiendo una distribución exponencial y donde el tiempo medio de servicio sigue una distribución de Poisson.

Además de los elementos mencionados anteriormente, se requiere un método para almacenar los eventos que tendrán lugar en iteraciones próximas a lo largo de toda la ejecución de la simulación.

En este caso se hace uso de una lista enlazada. Una lista enlazada es un tipo de dato auto-referenciado que contiene un puntero o enlace a otro dato del mismo tipo. Las listas enlazadas permiten inserciones y eliminación de nodos en cualquier punto de la lista en tiempo constante (suponiendo que dicho punto está previamente identificado o localizado), pero no permiten un acceso aleatorio. Existen diferentes tipos de listas

enlazadas, y en este caso la implementación utiliza listas enlazadas simples, las cuales únicamente permiten avanzar en una dirección.

A continuación se muestra el diagrama de flujo que representa el comportamiento del sistema:

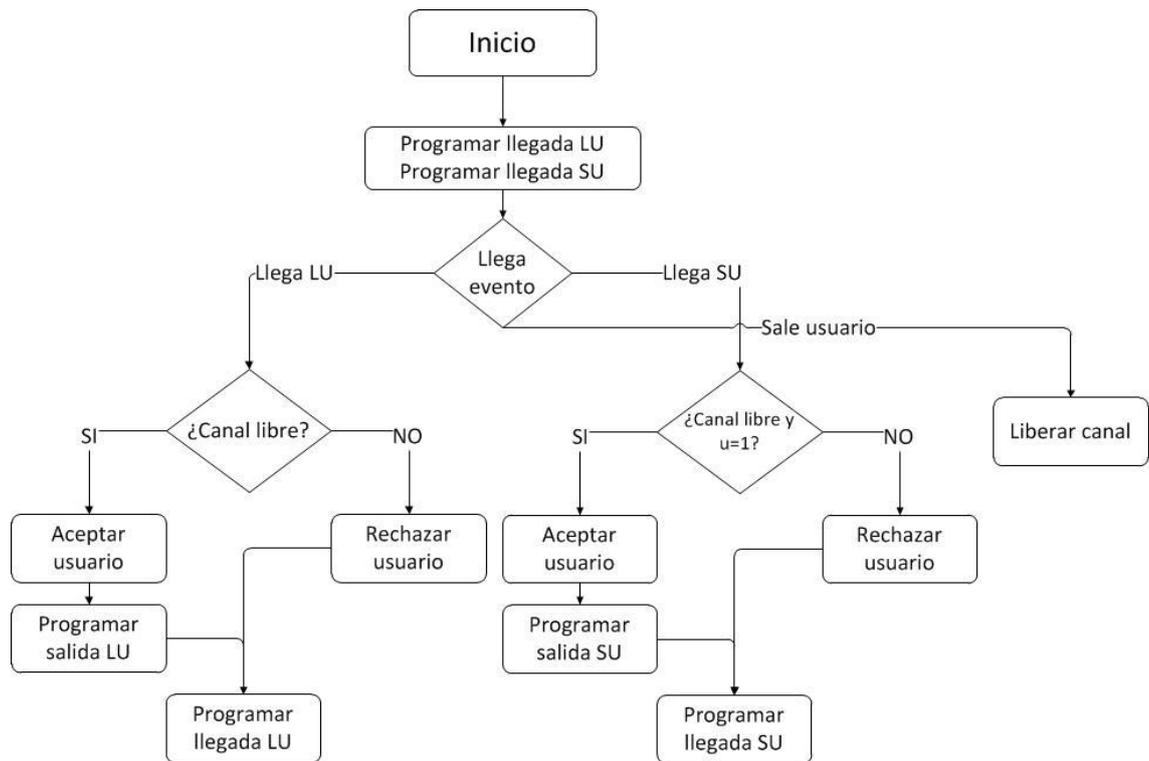


Figura 19: Diagrama de flujo del simulador

Donde, por simplicidad, se han eliminado las conexiones de realimentación.

Se puede observar que el comportamiento es consistente con lo que se ha explicado en otros apartados:

- Si llega un usuario principal y existe un canal libre, se le permite el acceso.
- En caso de que la llegada sea de un usuario secundario, sólo se le permitirá el acceso cuando $u = 1$ en el estado en que se encuentra el sistema y para la política que está siendo usada.

Una vez se cumple el número de iteraciones deseado se puede obtener fácilmente la probabilidad de bloqueo de cada tipo de usuario mediante las siguientes expresiones:

$$P_{BLU} = \frac{B_{LU}}{L_{LU}}$$

$$P_{BSU} = \frac{B_{SU}}{L_{SU}}$$

A partir de todo lo anterior se obtiene el valor medio de las probabilidades de bloqueo únicamente para un valor de α concreto; además dado que la simulación se realiza una sola vez, los resultados pueden no ser lo suficientemente realistas. Para solucionar este problema se puede repetir la simulación una cantidad determinada de veces con los mismos parámetros de entrada.

Esto permite la obtención de los siguientes valores:

- Media total de la media de todas las simulaciones.
- Varianza del valor obtenido de probabilidad de bloqueo.
- Intervalo de confianza asociado.

Mediante la obtención de dichos valores se consiguen unos resultados bien definidos que dan una idea de lo que cabe esperar en una implementación real.

Siendo $P_{BLU}(i)$ y $P_{BSU}(i)$ las probabilidades de bloqueo asociadas a ambos tipos de usuario en la simulación i , y N_{SIM} el número de simulaciones realizadas, se pueden obtener los valores medios como se muestra a continuación:

$$E\{P_{BLU}\} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{SIM}} P_{BLU}(i)}{N_{SIM}}$$

$$E\{P_{BSU}\} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{SIM}} P_{BSU}(i)}{N_{SIM}}$$

En cuanto a los valores de varianza:

$$Var\{P_{BLU}\} = E\{P_{BLU}^2\} - E\{P_{BLU}\}^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{SIM}} P_{BLU}(i)}{N_{SIM}} \right)^2 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{SIM}} P_{BLU}(i)^2}{N_{SIM}}$$

$$Var\{P_{BSU}\} = E\{P_{BSU}^2\} - E\{P_{BSU}\}^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{SIM}} P_{BSU}(i)}{N_{SIM}} \right)^2 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{SIM}} P_{BSU}(i)^2}{N_{SIM}}$$

Por último, se obtienen los intervalos de confianza:

$$P_{BLU} = \left[E\{P_{BLU}\} - z_{\alpha/2} \frac{\sqrt{Var\{P_{BLU}\}}}{\sqrt{n}}, E\{P_{BLU}\} + z_{\alpha/2} \frac{\sqrt{Var\{P_{BLU}\}}}{\sqrt{n}} \right]$$

$$P_{BSU} = \left[E\{P_{BSU}\} - z_{\alpha/2} \frac{\sqrt{Var\{P_{BSU}\}}}{\sqrt{N_{SIM}}}, E\{P_{BSU}\} + z_{\alpha/2} \frac{\sqrt{Var\{P_{BSU}\}}}{\sqrt{N_{SIM}}} \right]$$

Donde $z_{\alpha/2}$ es conocido como valor crítico y depende del porcentaje de confianza que se desea emplear para la estimación.

Como se ha mencionado anteriormente, a partir de este proceso se obtienen los estadísticos para un valor dado de α . Es por tanto necesaria la realización de un barrido para la obtención de un frente de Pareto que sirva de referencia a la hora de validar los resultados extraídos de cada modelo.

4. Pruebas

4.1 Introducción

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos mediante MATLAB a partir de la ejecución de cada uno de los modelos implementados; se observarán los resultados tanto del modelo basado en procesos de decisión de Markov como del modelo basado en programación, validando posteriormente los resultados a partir de la salida obtenida mediante el simulador.

Para ello se dividirá el apartado en distintos sub-apartados, en cada uno de los cuales se analizará un caso distinto; por tanto, será necesario definir los parámetros del escenario en cada caso, relacionarlo con una situación real, y posteriormente obtener los resultados. La estructura de cada escenario contendrá los siguientes puntos:

- Descripción del escenario.
- Resultados obtenidos a partir del modelo basado en MDP.
- Resultados obtenidos a partir del modelo basado en programación lineal.
- Resultados obtenidos a partir del simulador.
- Conclusiones extraídas del caso bajo estudio.

Además de los parámetros típicos relativos a cada escenario (tasas de entrada y de salida de cada tipo de usuario, y número de canales disponibles en el sistema) el modelo basado en programación lineal requiere un parámetro más, β , que como se ha explicado anteriormente determina la máxima probabilidad de error de los usuarios primarios que se está dispuesto a permitir en cada caso. β no será un único valor, si no que será un rango, ya que se desea barrer un espacio de valores lo suficientemente grande como para obtener el frente de Pareto. El rango adecuado dependerá en gran parte del escenario y, por tanto, se presentará su valor en cada uno de los sub-apartados.

En cuanto al simulador, también tiene un parámetro extra: el número de iteraciones. Este valor sin embargo será fijo para todos los casos, e igual a 1000.

4.2 Escenario 1

4.2.1 Descripción del escenario

En este primer escenario se emplearán los siguientes parámetros:

Parámetro del escenario	Valor
λ_{LU}	30
λ_{SU}	15
μ_{LU}	5
μ_{SU}	5
N	6

Tabla 3: Parámetros del escenario 1

En este caso se utilizan unos valores lo más estandarizados posibles para un entorno común:

- Existen más llamadas de usuarios primarios que de secundarios ya que, por norma general, los usuarios pueden acceder a la banda de frecuencias reservada por el operador que le está dando servicio, por lo que el número de usuarios secundarios es menor.
- Las llamadas tienen aproximadamente la misma duración o, lo que es lo mismo, salen del sistema a la misma velocidad, independientemente del tipo de usuario del que se trate. Dado que el sistema funciona de forma transparente de cara al usuario, las tasas de salida deberían de ser iguales.

Este primer escenario por tanto podría representar una situación más o menos real en una zona donde existe una gran cantidad de tráfico móvil (zona urbana), donde los operadores de los usuarios que se encuentran en dicha zona ofrecen cobertura a la totalidad de la ciudad, eliminando en cierta medida la utilización de redes de otros operadores salvo en aquéllos casos en los que todos los canales están saturados.

4.2.2 Resultados del modelo basado en MDP

La siguiente captura muestra los puntos obtenidos del frente de Pareto:

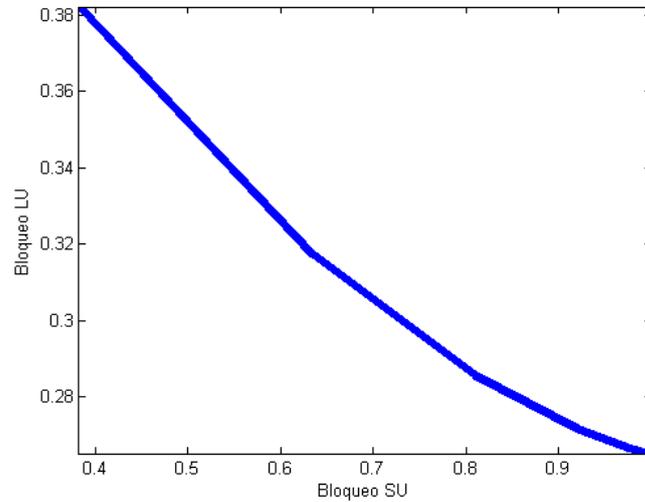


Figura 20: Frente de Pareto Escenario 1 (MDP)

4.2.3 Resultados del modelo basado en CMDP

Los valores de β que permiten obtener un frente de Pareto se encuentran en el rango $[0.1, 0.22]$. Esto quiere decir que fuera de ese rango su valor no es determinante y, por tanto, siempre se obtendría el mismo valor óptimo de la función objetivo.

La gráfica que se obtiene es la siguiente:

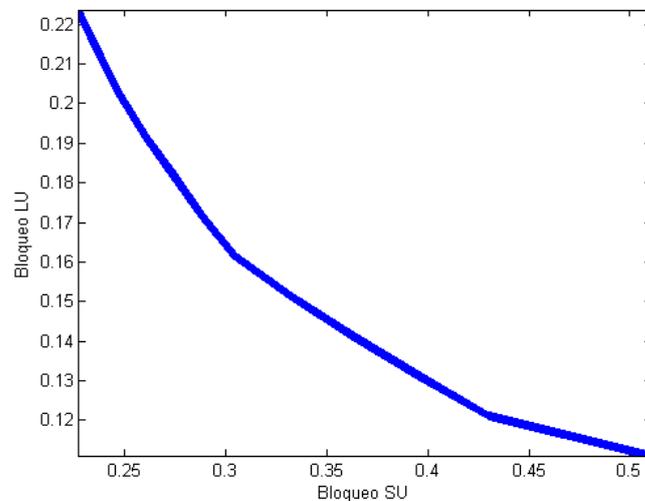


Figura 21: Frente de Pareto Escenario 1 (Programación Lineal)

4.2.4 Resultados del simulador

La gráfica obtenida a partir de la simulación es la que se muestra a continuación:

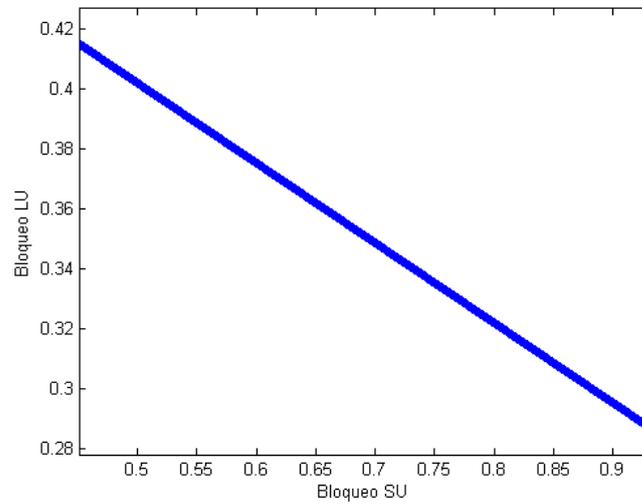


Figura 22: Frente de Pareto Escenario 1 (Simulación)

En cuanto a los valores de interés para cada α :

α	Bloqueo LU	Bloqueo SU	Varianza LU	Varianza SU	Intervalo LU	Intervalo SU
0	0.4421	0.4152	0.0016	0.0025	0.4171 0.4671	0.3840 0.4464
0.1	0.4404	0.4315	0.0012	0.0024	0.4194 0.4614	0.4009 0.4621
0.2	0.4555	0.4459	0.0008	0.0019	0.4376 0.4734	0.4188 0.4731
0.3	0.4405	0.4407	0.0008	0.0018	0.4226 0.4584	0.4145 0.4669
0.4	0.4537	0.4469	0.0006	0.0005	0.4380 0.4695	0.4334 0.4604
0.5	0.4403	0.4142	0.0011	0.0024	0.4201 0.4605	0.3842 0.4443
0.6	0.4133	0.4289	0.0011	0.0015	0.3926 0.4340	0.4051 0.4527
0.7	0.4337	0.4512	0.0011	0.0006	0.4127 0.4547	0.4366 0.4658
0.8	0.3474	0.6730	0.0005	0.0026	0.3336 0.3611	0.6412 0.7047
0.9	0.2545	0.9255	0.0003	0.0003	0.2438 0.2652	0.9151 0.9359
1	0.2588	1.0000	0.0008	0	0.2418 0.2758	1.0000 1.0000

Tabla 4: Valores de interés de la simulación del Escenario 1

4.3 Escenario 2

4.3.1 Descripción del escenario

Los parámetros del segundo escenario son los siguientes:

Parámetro del escenario	Valor
λ_{LU}	10
λ_{SU}	5
μ_{LU}	5
μ_{SU}	5
N	6

Tabla 5: Parámetros del escenario 2

En este caso la proporción entre los usuarios de ambos tipos es idéntica al caso anterior:

- Existen más llamadas de usuarios primarios que de secundarios ya que, por norma general, los usuarios pueden acceder a la banda de frecuencias reservada por el operador que le está dando servicio, por lo que el número de usuarios secundarios es menor.
- Las llamadas tienen aproximadamente la misma duración o, lo que es lo mismo, salen del sistema a la misma velocidad, independientemente del tipo de usuario del que se trate. Dado que el sistema funciona de forma transparente de cara al usuario, las tasas de salida deberían de ser iguales.

En este caso sin embargo se observa una carga menor, ya que ambas tasas de llegada son menores; las tasas de salida, sin embargo, se mantienen. Puede ser un escenario plausible en zonas donde la densidad de usuarios es menor, en las zonas más alejadas del centro de una ciudad.

4.3.2 Resultados del modelo basado en MDP

La siguiente captura muestra los puntos obtenidos del frente de Pareto:

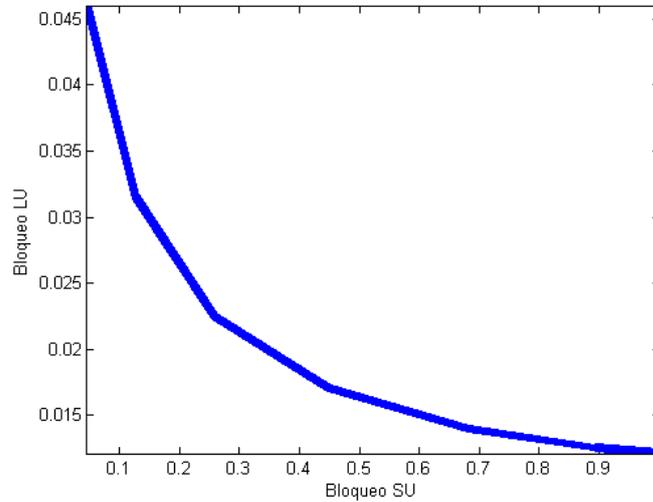


Figura 23: Frente de Pareto Escenario 2 (MDP)

4.3.3 Resultados del modelo basado en CMDP

Los valores de β que permiten obtener un frente de Pareto se encuentran en el rango [0.18, 0.186].

La gráfica que se obtiene es la siguiente:

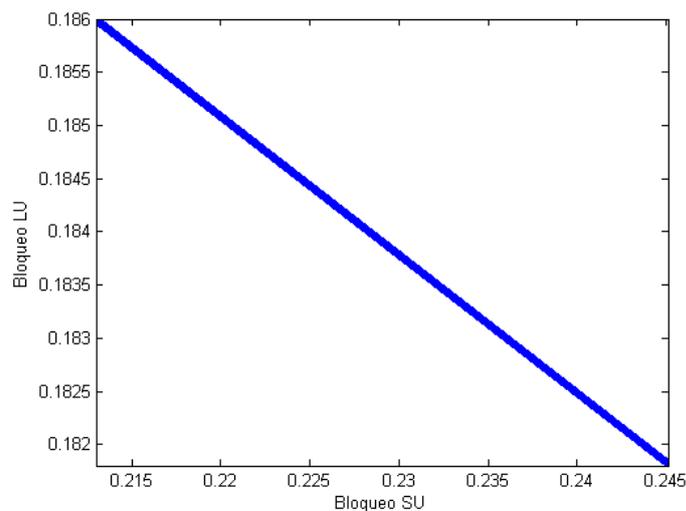


Figura 24: Frente de Pareto Escenario 2 (Programación Lineal)

4.3.4 Resultados del simulador

La gráfica obtenida a partir de la simulación es la que se muestra a continuación:

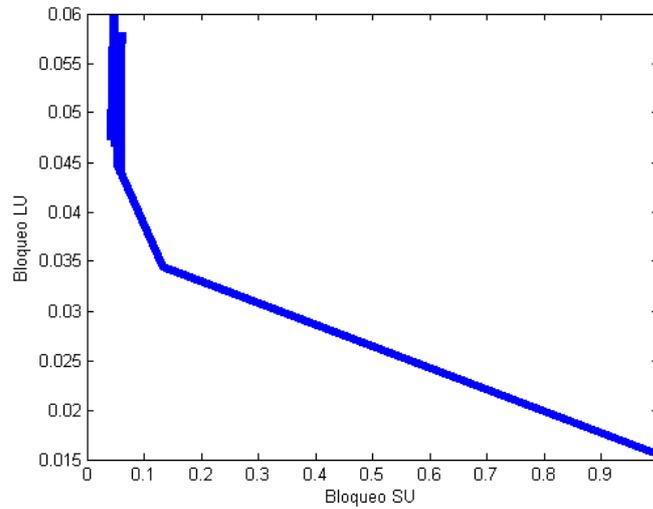


Figura 25: Frente de Pareto Escenario 2 (Simulación)

En cuanto a los valores de interés para cada α :

α	Bloqueo LU	Bloqueo SU	Varianza LU	Varianza SU	Intervalo LU	Intervalo SU
0	0.0473	0.0427	0.0004049	0.0003	0.0348 0.0598	0.0314 0.0541
0.1	0.0598	0.0475	0.0004721	0.0002	0.0463 0.0732	0.0390 0.0560
0.2	0.0439	0.0595	0.0000978	0.0006	0.0378 0.0500	0.0444 0.0745
0.3	0.0581	0.0601	0.0002145	0.0004	0.0490 0.0671	0.0476 0.0726
0.4	0.0513	0.0545	0.0001717	0.0006	0.0432 0.0594	0.0390 0.0701
0.5	0.0466	0.0483	0.0001708	0.0004	0.0385 0.0547	0.0365 0.0602
0.6	0.0504	0.0513	0.0005372	0.0004	0.0360 0.0648	0.0382 0.0643
0.7	0.0522	0.0527	0.0002126	0.0003	0.0432 0.0612	0.0419 0.0634
0.8	0.0448	0.0533	0.0001634	0.0010	0.0368 0.0527	0.0339 0.0727
0.9	0.0345	0.1331	0.0001826	0.0017	0.0261 0.0428	0.1073 0.1589
1	0.0155	1.0000	0.0001639	0	0.0076 0.0235	1.0000 1.0000

Tabla 6: Valores de interés de la simulación del Escenario 2

4.4 Escenario 3

4.4.1 Descripción del escenario

Los parámetros del tercer escenario son los siguientes:

Parámetro del escenario	Valor
λ_{LU}	10
λ_{SU}	30
μ_{LU}	5
μ_{SU}	5
N	6

Tabla 7: Parámetros del escenario 3

En este caso el sistema tiene mucha más carga de usuarios sin licencia que de usuarios con licencia:

- Existen más llamadas de usuarios secundarios que de primarios. Esto se puede dar en determinadas situaciones donde la región está cubierta mayoritariamente por un operador en particular.
- Del mismo modo que antes, las llamadas tienen la misma duración en ambos casos.

4.4.2 Resultados del modelo basado en MDP

La siguiente captura muestra los puntos obtenidos del frente de Pareto:

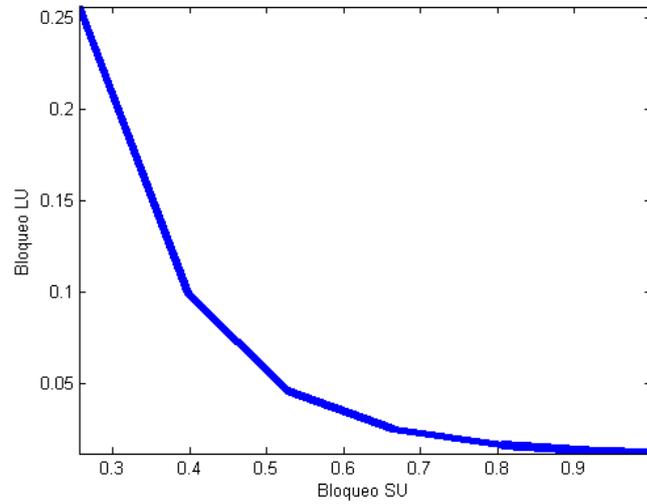


Figura 26: Frente de Pareto Escenario 3 (MDP)

4.4.3 Resultados del modelo basado en CMDP

Los valores de β que permiten obtener un frente de Pareto se encuentran en el rango [0.02, 0.2].

La gráfica que se obtiene es la siguiente:

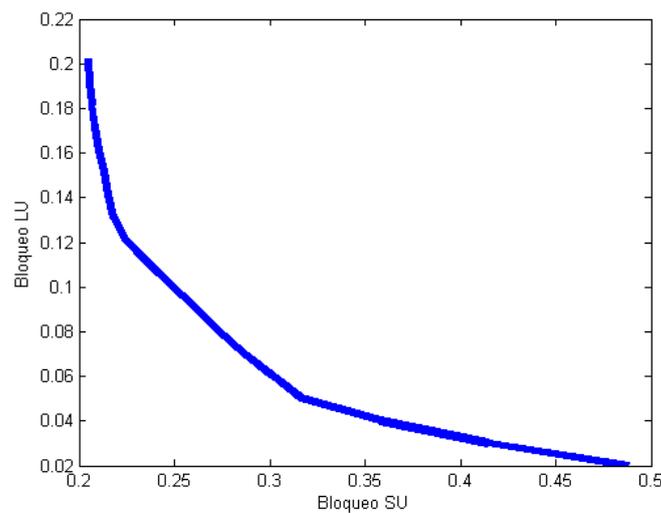


Figura 27: Frente de Pareto Escenario 3 (Programación Lineal)

4.4.4 Resultados del simulador

La gráfica obtenida a partir de la simulación es la que se muestra a continuación:

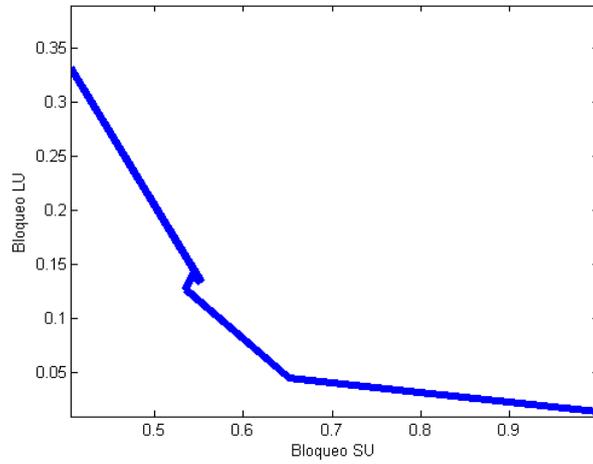


Figura 28: Frente de Pareto Escenario 3 (Simulación)

En cuanto a los valores de interés para cada α :

α	Bloqueo LU	Bloqueo SU	Varianza LU	Varianza SU	Intervalo LU	Intervalo SU
0	0.3781	0.3931	0.0019	0.0020	0.3510 0.4053	0.3654 0.4208
0.1	0.3816	0.3936	0.0020	0.0008	0.3538 0.4094	0.3762 0.4110
0.2	0.4231	0.3998	0.0026	0.0015	0.3915 0.4548	0.3761 0.4234
0.3	0.3815	0.3858	0.0012	0.0004	0.3601 0.4028	0.3740 0.3976
0.4	0.3710	0.3759	0.0013	0.0007	0.3487 0.3932	0.3594 0.3925
0.5	0.1334	0.5519	0.0015	0.0004	0.1095 0.1572	0.5394 0.5643
0.6	0.1408	0.5428	0.0017	0.0005	0.1154 0.1663	0.5287 0.5569
0.7	0.1263	0.5349	0.0007	0.0003	0.1101 0.1426	0.5248 0.5450
0.8	0.0450	0.6505	0.0005	0.0012	0.0317 0.0582	0.6293 0.6716
0.9	0.0327	0.7857	0.0005	0.0007	0.0193 0.0462	0.7688 0.8026
1	0.0135	1.0000	0.0001	0	0.0071 0.0200	1.0000 1.0000

Tabla 8: Valores de interés de la simulación del Escenario 3

4.5 Escenario 4

4.5.1 Descripción del escenario

Los parámetros del cuarto escenario son los siguientes:

Parámetro del escenario	Valor
λ_{LU}	20
λ_{SU}	20
μ_{LU}	5
μ_{SU}	5
N	3

Tabla 9: Parámetros del escenario 4

- En este caso todos los usuarios producen la misma cantidad de llamadas por unidad de tiempo independientemente de su tipo. El estudio de este caso es interesante ya que se compite por el medio en igualdad, y por tanto el controlador actuará en gran parte de las ocasiones impidiendo el paso de llamadas de usuarios sin licencia.
- Del mismo modo que antes, las llamadas tienen la misma duración en ambos casos.
- Se ha reducido el número de canales para observar el comportamiento del sistema en una situación crítica.

4.5.2 Resultados del modelo basado en MDP

La siguiente captura muestra los puntos obtenidos del frente de Pareto:

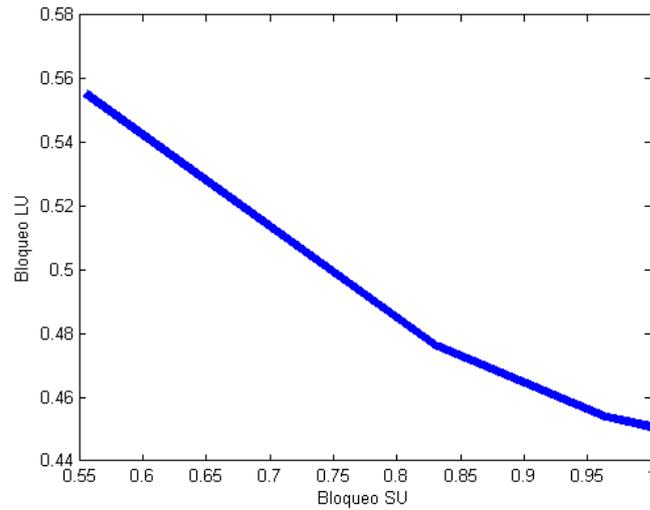


Figura 29: Frente de Pareto Escenario 4 (MDP)

4.5.3 Resultados del modelo basado en CMDP

Los valores de β que permiten obtener un frente de Pareto se encuentran en el rango [0.25, 0.37].

La gráfica que se obtiene es la siguiente:

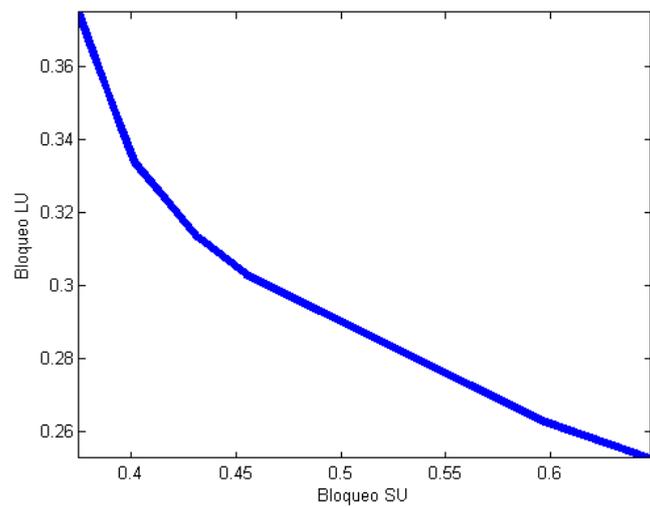


Figura 30: Frente de Pareto Escenario 4 (Programación Lineal)

4.5.4 Resultados del simulador

La gráfica obtenida a partir de la simulación es la que se muestra a continuación:

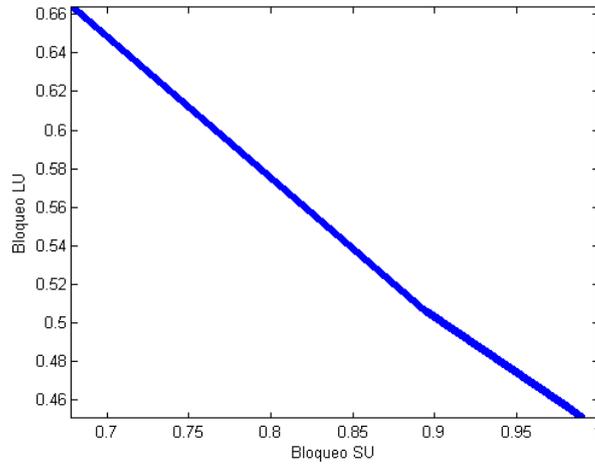


Figura 31: Frente de Pareto Escenario 4 (Simulación)

En cuanto a los valores de interés para cada α :

α	Bloqueo LU	Bloqueo SU	Varianza LU	Varianza SU	Intervalo LU	Intervalo SU
0	0.6676	0.6873	0.0007	0.0004341	0.6510 0.6842	0.6744 0.7002
0.1	0.6681	0.6891	0.0004	0.0008424	0.6557 0.6805	0.6711 0.7071
0.2	0.6644	0.6673	0.0004	0.0004157	0.6516 0.6772	0.6547 0.6800
0.3	0.6720	0.6645	0.0012	0.0009192	0.6505 0.6935	0.6457 0.6833
0.4	0.6778	0.6765	0.0006	0.0009181	0.6623 0.6933	0.6577 0.6953
0.5	0.6652	0.6849	0.0007	0.0006312	0.6484 0.6819	0.6693 0.7004
0.6	0.6772	0.6762	0.0007	0.0003903	0.6612 0.6932	0.6640 0.6884
0.7	0.6662	0.6757	0.0006	0.0004945	0.6515 0.6810	0.6619 0.6895
0.8	0.5056	0.8950	0.0008	0.0005025	0.4885 0.5228	0.8811 0.9089
0.9	0.4577	0.9786	0.0014	0.0000589	0.4343 0.4812	0.9739 0.9834
1	0.4445	1.0000	0.0011	0	0.4238 0.4652	1.0000 1.0000

Tabla 10: Valores de interés de la simulación del Escenario 4

5. Conclusiones

5.1 Resultados del estudio

Las más inmediatas conclusiones a las que se llega tras la observación de los resultados aportados por las distintas pruebas son:

- En general, se obtienen valores de bloqueo ligeramente menores en el caso de la aproximación CMDP.
- El uso de este tipo de políticas donde se trata de minimizar las probabilidades de bloqueo es especialmente útil en escenarios donde la carga de tráfico es alta por parte de ambos tipos de usuario.

El primer hecho puede deberse a la propia naturaleza de las políticas obtenidas a partir del modelo MDP con restricciones; se trata de políticas no deterministas que, como se ha mencionado, se refieren a la asignación de unas probabilidades determinadas a cada tipo de control en lugar de un control concreto a cada estado. De esta forma no siempre se toma el mismo valor de la variable de control, lo que en determinadas situaciones podría empeorar los resultados. Como contraposición se tienen las políticas deterministas obtenidas a partir del modelo MDP, donde un valor de la variable de control es asignado de forma fija a cada estado. Un efecto además, no apreciado en las gráficas (al haber sido dibujadas de forma continua), es que el número de puntos obtenido es menor en el caso del modelo MDP; se debe, nuevamente, a que sólo obtiene políticas deterministas, siendo incapaz de recorrer todo el espacio de valores.

El segundo hecho es lógico y es debido a que, en situaciones donde sólo uno de los tipos de usuario es claramente predominante, el otro tipo obtendrá probabilidades de bloqueo muy bajas independientemente de la variable de control seleccionada. En escenarios donde principalmente encontramos usuarios sin licencia puede ser especialmente interesante el uso de una asignación de frecuencias por subasta, donde se ofrece el uso del canal a aquél usuario que está dispuesto a pagar más por él.

En cuanto a las gráficas correspondientes al simulador, se observa que son más parecidas a aquéllas obtenidas a partir del modelo MDP. Esto es así porque las políticas empleadas en todas las simulaciones son las obtenidas a partir de este modelo (políticas deterministas).

Se observa que, en las gráficas obtenidas a partir del modelo CMDP, el eje X (o probabilidad de bloqueo de los usuarios sin licencia) no llega hasta su máximo posible como en el resto. Se debe a problemas de resolución en CVX, que impiden la obtención de la solución del sistema de ecuaciones lineales cuando el valor β establecido (bloqueo máximo de usuarios con licencia) es demasiado bajo.

En cuanto a las particularidades de cada escenario, en el primero de ellos se tenía una situación más o menos “estándar” con una mayor cantidad de llamadas por parte de los usuarios primarios. Se observan unas probabilidades de bloqueo relativamente bajas para los usuarios primarios cuando aquéllas para los usuarios secundarios son mayores que 0.9, aumentando por tanto cuando esta cifra disminuye. La razón de estas altas probabilidades de bloqueo es principalmente el bajo número de canales; esto permite, sin embargo, observar el efecto de este tipo de métodos de acceso con mayor claridad.

En el segundo escenario se ha disminuido el número de llamadas por parte de los dos tipos de usuario, lo que permite obtener probabilidades de bloqueo muy bajas para ambos. En este caso el uso de este tipo de modelos es menos crítico ya que, al haber una baja cantidad de tráfico, las probabilidades de bloqueo de los usuarios con licencia no aumentan de forma significativa incluso cuando las probabilidades de bloqueo de los usuarios secundarios se mantienen muy bajas.

En el tercer escenario se tiene una situación intermedia, en este caso siendo los usuarios secundarios los que más carga proporcionan a la red. Debido a este hecho, cuando la probabilidad de bloqueo de los usuarios sin licencia es aproximadamente de 0.5 (la mitad de sus llamadas son bloqueadas) la probabilidad de bloqueo de los usuarios con licencia es aproximadamente de 0.05, lo suficientemente baja como para que la calidad del servicio no se vea afectada en exceso. Un pequeño decremento en el

bloqueo de los usuarios sin licencia sin embargo aumenta de forma exponencial las probabilidades de bloqueo de los usuarios con licencia.

Por último, el cuarto escenario muestra un aporte idéntico por parte de ambos tipos de usuario. El sistema se comporta de forma prácticamente lineal, cambiando la probabilidad de bloqueo de los usuarios con licencia de forma inversamente proporcional a la de los usuarios sin licencia. Se ha disminuido además el número de canales, originando unas probabilidades en general mayores.

5.2 Líneas de trabajo futuras

La radio cognitiva constituye un nuevo paradigma dentro de las comunicaciones inalámbricas (particularmente, dentro de las comunicaciones móviles). Numerosas investigaciones se llevan a cabo continuamente y, por tanto, es inmensa la cantidad de formas de llegar a una solución válida y conceptos aplicables dentro de este campo.

En este caso se ha tratado de mantener una determinada calidad de servicio entre dos tipos de usuario minimizando sus probabilidades de bloqueo. Existen sin embargo muchos objetivos que se pueden perseguir a la hora de optimizar este tipo de redes, entre otros, el beneficio económico.

Independientemente del objetivo a conseguir, es posible un entorno mucho más heterogéneo aumentando la cantidad de tipos de usuario. Pese a que esta posibilidad aumentaría la complejidad del sistema, se podría priorizar cada tipo de usuario a distintos niveles en función de determinados parámetros.

En este proyecto, además, se ha optado por una solución centralizada. Existen numerosas herramientas disponibles, sin embargo, para afrontar una solución de forma distribuida, lo que eliminaría el cuello de botella que supone la existencia de un controlador central y aumentaría la fiabilidad. Una de ellas es la teoría de juegos, interesante concepto aplicable a este tipo de redes que sin duda podría aumentar su eficiencia de forma significativa.

Bibliografía

1. **Federal Communications Commission.** *Federal communications commission: spectrum policy task force report.* 2001.
2. **Buddhikot, M. M.** *Understanding dynamic spectrum access: models, taxonomy and challenges.* 2007.
3. **Haykin, S.** *Cognitive radio: brain-empowered wireless communications.* 2005.
4. **Ekram Hossain, Dusit Niyato, Zhu Han.** *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks.* s.l. : Cambridge, 2009.
5. **Fette, B.A. Fette and B.** *Cognitive Radio Technology.* 2006.
6. **K. Challapali, C. Cordeiro, and D. Birru.** *Evolution of spectrum-agile cognitive radios: first wireless Internet standard and beyond.* 2006.
7. MATLAB. [Online] <http://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>.
8. Página web oficial de CVX. [Online] <http://cvxr.com/cvx/>.
9. *A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum.* **D. Cabric, S. M. Mishra, D. Willkomm, R. Brodersen, and A. Wolisz.** 2005.
10. *DIMSUNnet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum.* **M. M. Buddhikot, P. Kolody, S. Miller, K. Ryan, and J. Evans.** 2005.
11. *DRiVE-ing to the Internet: dynamic radio for IP services in vehicular environments.* **L. Xu, R. Tonjes, T. Paila, W. Hansmann, M. Frank, and M. Albrecht.** 2000.
12. **Bertsekas, D. P.** *Dynamic Programming and Optimal Control, vol. 2.* 2007.
13. **Kleinrock, Leonard.** *Packet Switching in a Multiaccess Broadcast Channel: Dynamic Control Procedures.* 1975.
14. **Heng Wang, and Narayan B. Mandayam.** *Opportunistic File Transfer Over a Fading Channel Under Energy and Delay Constraints.* 2005.
15. **Liu, Beibei Wang and K. J. Ray.** *Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey.*

16. **Shiying Zhang, F. Richard Yu, and Victor C. M. Leung.** *Joint Connection Admission Control and Routing in IEEE 802.16-Based Mesh Networks.* 2010.
17. **Jakob Carlstrom, Raphael Rom.** *Application-aware Admission Control and Scheduling in Web Servers.* 2002.
18. **Ioannis Ch. Paschalidis, and John N. Tsitsiklis.** *Congestion-Dependent Pricing of Network Services.* 2000.
19. **John N. Tsitsiklis, and Benjamin Van Roy.** *Regression Methods for Pricing Complex American-Style Options.* 2001.
20. **Hao Wang, Yang Gao, and Xingguo Chen.** *RL-DOT: A Reinforcement Learning NPC Team for Playing Domination Games.* 2010.
21. **Das, Saif J. Fakh and Tapas K.** *LEAD: A Methodology for Learning Efficient Approaches to Medical Diagnosis.* 2006.
22. **Dantzig, M. K. Wood and G. B.** *Programming of interdependent activities: I, general discussion.* 1949.
23. **Khachian, L. G.** *A polynomial algorithm in linear programming.* 1979.