

# Aplicación de esquemas de Acceso Oportunista al Espectro en ambientes inalámbricos heterogéneos

**Daniel Ospina, Andrés F. Ocampo,  
Roberto Hincapié**

*Facultad de Ingeniería Informática  
y Telecomunicaciones  
Universidad Pontificia Bolivariana,  
Medellín (Colombia)*

**Resumen:** El Acceso Oportunista al Espectro es un conjunto de alternativas que buscan minimizar los problemas de escasez e ineficiencia en el uso del espectro radioeléctrico ocasionados por los procedimientos actuales de administración y asignación de tal recurso. Este artículo presenta las modificaciones y ajustes realizados al modelo de Acceso Oportunista al Espectro desarrollado por Uргаonkar, R. y Neely, M. (2008) para evaluar su aplicabilidad en escenarios realistas de red inalámbrica primaria y de despliegue actual (GSM en coexistencia con DVB-T particularmente). Las modificaciones realizadas incluyen la propuesta de dos objetivos de optimización adicionales que definen nuevos criterios de asignación de recursos: *Proportional Fairness*, que considera los requerimientos particulares de cada usuario secundario y maximiza la ocupación total del sistema, y *Max-Min Fairness*, que establece una política de distribución equitativa de la disponibilidad espectral para la maximización del mínimo valor de *throughput* garantizado a los usuarios secundarios.

**Palabras clave:** Acceso Oportunista al Espectro, ambiente inalámbrico heterogéneo, análisis de encolamiento, criterios de equidad, control de flujo y asignación de recursos.

## 1. Introducción

---

El Acceso Oportunista al Espectro (*OSA, Opportunistic Spectrum Access*), concepto introducido dentro del marco del proyecto *Defense Advanced Research Projects Agency Next Generation (xG Project)* [1], constituye uno de los enfoques de Acceso Dinámico al Espectro (*DSA, Dynamic Spectrum Access*) que buscan mitigar los problemas de escasez e ineficiencia en el uso del espectro radioeléctrico ocasionados por los actuales procedimientos de administración y asignación de este recurso. Siguiendo un esquema jerárquico, bajo las nociones de *OSA* los usuarios secundarios (usuarios no licenciados) pueden acceder y explotar las porciones espectrales no utilizadas por los usuarios primarios (usuarios licenciados) en algún instante de tiempo o región geográfica. Estos últimos usuarios poseen los derechos de propiedad para el uso exclusivo de porciones espectrales específicas. Las bandas espectrales no utilizadas se conocen como huecos u oportunidades espectrales, que en conjunto constituyen la disponibilidad local e instantánea del recurso radioeléctrico para los usuarios secundarios [2].

El trabajo presentado en [2], [3] y [4] establece un estudio de los principales aspectos y conceptos relacionados con *DSA*, *OSA* y los Radios Cognitivos, que constituyen la tecnología facilitadora para la utilización dinámica del espectro. Asimismo, un estudio de los principales retos en el diseño del control de acceso al medio en las redes basadas en *OSA* es realizado en [5], donde se introduce igualmente un estado del arte de las principales propuestas relacionadas con estas temáticas. En [6] se realiza un análisis de los límites de capacidad conseguidos por los usuarios secundarios que acceden oportunamente a los canales de radio de una red primaria GSM (*Global System for Mobile communications*) en la banda de 850 MHz, bajo distintas clases de restricciones impuestas por los usuarios primarios del sistema. Por otro lado, en [7] los autores presentan una caracterización de las dinámicas de ocupación y uso de los canales primarios en bandas licenciadas, particularmente en la banda donde operan los servicios de telefonía celular. Además concluyen sobre la viabilidad e implicaciones del acceso dinámico al espectro en esta banda dadas sus estadísticas de ocupación.

En este artículo se presentan las modificaciones realizadas a la propuesta de asignación de recursos basada en *OSA* que se describe [8]. Los cambios introducidos al modelo buscan ofrecer criterios para evaluar la aplicabilidad de la propuesta en ambientes de operación realistas y de despliegue actual, teniendo en cuenta el comportamiento de los usuarios secundarios (modelos de movilidad, esquemas de generación de paquetes, entre otros) y parámetros generales de las redes primarias coexistentes. Se presenta también una extensión al esquema de asignación de recursos propuesto en [8] con el objetivo de realizar distribuciones de canales espectrales de forma proporcional a los requerimientos de cada uno de los usuarios secundarios y se ofrece una alternativa para establecer criterios equitativos de asignación de recursos en la red de radios cognitivos.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta en detalle el modelo propuesto, resaltando las características y parámetros de operación de las redes primarias coexistentes GSM y DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*), los criterios de asignación de recursos introducidos y las condiciones de operación de la red de usuarios secundarios. Resultados en cuanto a *throughput* promedio, congestión total promedio, congestión por usuario y porcentaje de *throughput* por usuario, son presentados y discutidos en la sección 3. En la sección 4 se concluye el artículo.

## 2. Modelo propuesto

El trabajo presentado en este artículo parte de la propuesta de asignación de recursos, basada en ideas de *OSA*, de [8]. Aquí se ofrece un escenario de red primaria más realista que atiende a estadísticas de ocupación y parámetros de operación convencionales de redes inalámbricas de despliegue actual. Para ello se define un ambiente de red primaria heterogéneo GSM + DVB-T. Se modifica el comportamiento de los usuarios secundarios, planteando un nuevo modelo de movilidad, esquemas diferentes de generación de paquetes y modelos de requerimientos no uniformes. Finalmente, se introducen dos nuevos esquemas de optimización para los procesos de asignación de recursos: maximización del *throughput* entregado a cada usuario secundario de manera proporcional a sus requerimientos de comunicación (*Proportional Fairness* [9]); y maximización de un valor mínimo de *throughput* garantizado a cada usuario secundario (*Max-Min Fairness* [9]). De esta forma se ofrecen criterios para la evaluación de los niveles de equidad sobre la red de usuarios no licenciados en condiciones generales.

### 2.1. Escenario de red primaria heterogénea GSM + DVB-T

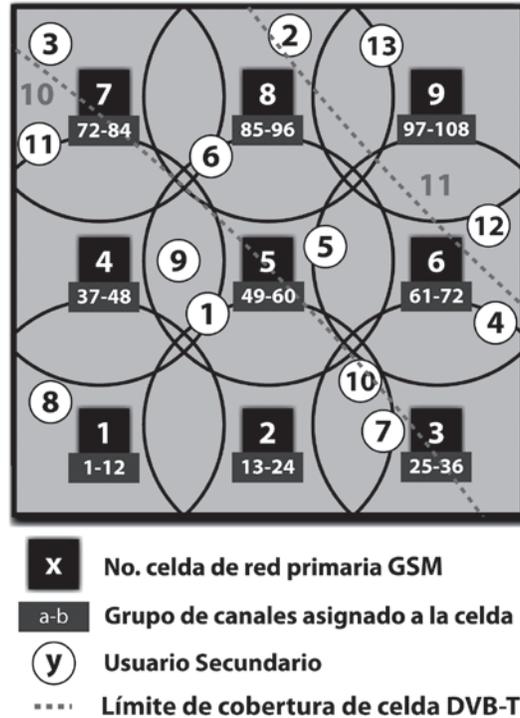
A continuación se hace una descripción de las redes primarias coexistentes que configuran el escenario heterogéneo GSM + DVB-T. Se establece un modelo general para las simulaciones que son discutidas en la sección 3, atendiendo a las consideraciones, supuestos y parámetros de configuración del escenario de red propuesto en [8].

#### 2.1.1. Red GSM

El entorno de red heterogénea GSM + DVB-T que se propone utiliza una región de cobertura similar al escenario de red primaria presentado en [8]: una zona de cubrimiento total con forma rectangular dividida en nueve celdas. En este caso, sin embargo, las celdas GSM presentan una forma circular, ocurriendo un traslape de cobertura entre una celda y otra de aproximadamente 22%, como lo muestran las zonas circulares con línea negra continua de la Figura 1. Así, un usuario secundario

ubicado en una zona de solapamiento tiene la posibilidad de acceder a un grupo de canales pertenecientes a más de una celda.

Figura 1: Esquema de cobertura heterogéneo GSM + DVB-T



Se asume que cada una de las celdas de la red primaria GSM dispone de 12 portadoras o canales en frecuencia, atendiendo a la asignación de canales por celda de los procesos de planeación de frecuencias en una red GSM convencional. En tales entornos, cada celda es normalmente dividida, desde el centro hacia la periferia a manera de radio, en tres sectores de área semejante. Cada uno de estos sectores, en condiciones comunes de tráfico y ocupación en ambientes urbanos, utiliza cuatro portadoras de frecuencias diferentes para el acceso de los usuarios al servicio [10], [11], [12].

Los procesos de transición de estado de los canales de cada celda GSM están gobernados por una cadena markoviana ON/OFF con probabilidades de transición no simétricas. Sus valores son determinados en simulación en este caso, utilizando estadísticas de generación y duración de llamadas comúnmente presentadas en la mayoría de redes de telefonía móvil celular desplegadas actualmente (detalladas en la Tabla 1). Este procedimiento es realizado desde el proceso real de organización y ocupación de las tramas y los intervalos de tiempo del sistema GSM [10], [13].

Tabla 1: Estadísticas de tráfico por usuario de una red GSM en entornos urbanos y suburbanos<sup>1</sup>

	Tasa de inicio de llamadas ( $\lambda_{\text{GSM}}$ llam/seg)	Tasa de finalización de llamadas ( $\mu_{\text{GSM}}$ llam/seg)
Valor mínimo	$3,9 \text{ e}^{-5}$	$1,6 \text{ e}^{-3}$
Valor máximo	$9,42 \text{ e}^{-4}$	$7,7 \text{ e}^{-3}$

De forma similar al caso simplificado de [8], cada uno de los canales puede transportar exactamente 1 paquete/ranura de tiempo. Esto puede asumirse debido a que, si bien las portadoras de un sistema GSM tienen un ancho de banda de 200 kHz y llegan a transportar una cantidad menor a los 30 kbit/s (red GSM convencional, no operando con GPRS ni EDGE) [14], no existe ningún criterio de comparación de desempeño de las transmisiones de los usuarios secundarios cuando usan canales de ancho de banda mayor o menor a los 200 kHz. Se establece de esta manera un nivel genérico que ofrece una base balanceada para recoger la configuración de modulación y codificación de mayor eficiencia espectral en los dispositivos basados en radios cognitivos de los usuarios secundarios, pero con un tamaño de paquete que puede llegar a tener una longitud en bytes bastante considerable en alguna situación.

### 2.1.2. Red DVB-T

En coexistencia con la red GSM, adicionalmente se define un conjunto de celdas DVB-T que, como aproximación conveniente a los procesos de simulación, tienen un radio de cobertura de 20 veces el radio de cobertura de una celda GSM (cuyo radio varía entre 300 m y 1 km comúnmente en entornos urbanos y suburbanos de implementación real [15], [16]), de acuerdo a lo mostrado en la Figura 1 para las regiones circulares en línea roja discontinua. Esta configuración concuerda con las implementaciones en simulación y en entornos reales de sistemas DVB-T [17], [18], donde las redes de televisión presentan celdas con regiones de cobertura que pueden abarcar varias celdas del sistema de telefonía móvil celular.

Los sistemas de televisión digital DVB-T (operando en ausencia de sistemas de interactividad o en configuración híbrida con otras tecnologías), y en general de cualquier tipo de TV, presentan una difusión continua de todo el contenido por celda en cada franja de programación en el día. Esto significa que la variabilidad en la ocupación de los canales por celda es normalmente muy baja. Así, una probabilidad de transición

<sup>1</sup> Datos obtenidos del operador de telefonía móvil celular TIGO. BTS de un BSC ubicado en el sector de El Poblado. Medellín (Colombia), 2006.

del estado de ocupación a desocupación de un canal de DVB-T con valor de 0 (y una probabilidad de transición de desocupado a ocupado de 1) es una suposición que puede ser verificada en varios entornos de implementación real. En la misma forma, un canal dejado libre por los operadores de un sistema DVB-T en cualquier territorio puede presentar probabilidades de transición de ocupado a desocupado y de desocupado a ocupado de 1 y 0 respectivamente. En este caso, se asumen aleatoriamente hasta 2 canales libres todo el tiempo por cada celda DVB-T que abarca algún porcentaje de la región de cobertura general, buscando similitud con el modo de operación de red con Frecuencia Múltiple (*MFN, Multi Frequency Network*) que especifica el estándar DVB-T como alternativa de implementación [19]. Allí, las probabilidades de transición de estados son asimétricas e invariantes en los valores extremos descritos: 0 para el caso de desocupación a ocupación, y 1 para el caso contrario.

El ancho de banda de los canales utilizados por el sistema DVB-T puede ser hasta de 8 MHz. Esto implica que la eficiencia espectral de las comunicaciones realizadas por los dispositivos basados en radios cognitivos de los usuarios secundarios debe ser mucho mayor a la alcanzada al usar canales de 200 kHz de un sistema GSM. En este sentido, cada ranura de tiempo, un usuario secundario usando un canal de 8 MHz debe ser capaz de transmitir un número de paquetes de hasta 40 veces los transmitidos al usar un canal GSM. Aquí, buscando conveniencia en los procesos de simulación, se asume que los usuarios secundarios pueden transmitir hasta 5 paquetes/ranura de tiempo cuando usan un canal de una celda DVB-T. Este supuesto de 5 paquetes/ranura de tiempo es suficiente para garantizar la heterogeneidad del escenario de red primaria mencionado.

Finalmente, en el escenario heterogéneo general, el número de usuarios secundarios incluidos en los procesos de simulación resulta de la multiplicación del número de usuarios en la simulación de la propuesta original por un factor de doce (cada celda tiene doce canales, y no uno como en el escenario original), pues aunque la relación de tráfico ofrecido y número de usuarios secundarios no crece linealmente con el aumento del número de canales, la correspondencia entre estas cantidades debe ser tenido en cuenta con el fin de observar fenómenos similares a los mostrados en [8]. No es necesario realizar un ajuste en el número de 96 usuarios por la existencia de los canales adicionales de la red DVB-T, pues su pequeña cantidad no afecta el balance entre el número de canales primarios y el número de usuarios secundarios para un nivel de ocupación media del sistema.

## 2.2. Objetivos de optimización y esquemas de asignación de recursos

En esta subsección se presentan los criterios de asignación de recursos según las nociones de los problemas de optimización que se quieren evaluar para definir escenarios más justos de utilización de los canales espectrales. Estos planteamientos

caracterizan el problema de planificación, asignación y control de flujo en los escenarios de red propuestos.

### 2.2.1. Maximización del throughput total de la red de usuarios secundarios

Para la implementación del objetivo de optimización que maximiza la cantidad total de tráfico cursado por la red de usuarios secundarios se adopta el algoritmo de control de flujo y asignación de recursos (*CNC, Cognitive Network Algorithm Control*) propuesto en [8]. Este algoritmo plantea una política de control de flujo para la entrada de datos en las colas de capa de red de los dispositivos basados en radios cognitivos. El control de flujo depende de los valores que se fijen para el parámetro de peso  $\theta_n$  del usuario secundario  $n$  y el parámetro de control  $\nu$  de toda la red secundaria. En este sentido, si un usuario presenta una alta cantidad en el producto de  $\nu$  y  $\theta$ , su cola de capa de red puede ser llenada con una gran cantidad de paquetes, traduciéndose finalmente en un alto valor en la función de pesos para la asignación de canales.

El algoritmo *CNC* introduce también, en comunión con los procesos de control de flujo, una política de planificación para la asignación de los recursos espectrales compartidos por los usuarios secundarios en la red. Puede verse desde tales planteamientos que el proceso de asignación de los canales está determinado por la cantidad de paquetes represados en la cola de capa de red de los usuarios secundarios y por la cantidad de paquetes que existen en las colas virtuales de colisión de cada uno de los canales primarios (además de la probabilidad de que el canal primario esté libre en el próximo intervalo de tiempo). Esta última cantidad da cuenta de las colisiones sufridas sobre los canales primarios por la transmisión simultánea de usuarios primarios y secundarios. Estos parámetros conforman la función pesos del problema de optimización *Maximum Weight Match (MWMP)* que puede ser resuelto en tiempo polinomial para la asignación de los canales espectrales con menor cantidad de colisiones en la cola virtual a los usuarios con mayor nivel de congestión en las colas de capa de red.

Los autores de [8] mencionan que la utilización del *Maximum Weight Match Problem* puede resultar en un ejercicio complicado para cantidades de recursos y de usuarios considerable, y porque se necesita del conocimiento constante de todos los parámetros que involucran las restricciones del problema de optimización (implica un control centralizado de la red). Proponen entonces una implementación distribuida sobre cada una de las celdas de la red desde el uso del algoritmo *Greedy Maximal Match Scheduling* con la función de pesos del problema *MWMP* para los procesos de asignación de recursos. Este algoritmo es utilizado en las formulaciones presentadas en este artículo para realizar los procesos de asignación de recursos de los escenarios realistas propuestos.

### 2.2.2. Maximización del throughput proporcionalmente a los requerimientos de los usuarios secundarios

Los planteamientos formulados en [8] soportan los casos en los que los valores de  $\theta$  son diferentes entre los usuarios secundarios. Sin embargo, los resultados de simulación mostrados en [8] corresponden al caso en el que dicho parámetro es igual y constante para todos los usuarios secundarios.

En este caso particular, se tiene como objetivo maximizar el *throughput* total de la red de usuarios secundarios, asignando los recursos en forma proporcional a los requerimientos de comunicación de cada uno. Por esta razón, el valor del parámetro de peso  $\theta$  en el algoritmo *CNC* debe hacerse dependiente de la cantidad de recursos que cada usuario demanda. Tales requerimientos están representados por las tasas de generación de paquetes  $\lambda$  de cada dispositivo de usuario secundario. Así, si un usuario secundario tiene una alta tasa  $\lambda$ , los procesos de control de flujo permiten una gran cantidad de datos en su cola de capa de red por su alto valor de  $\theta$ .

Conforme a lo anterior, se define entonces  $k$  como la constante de proporcionalidad entre  $\theta_n$  y  $\lambda_n$  (para el usuario secundario  $n$ ). Esta constante está determinada por el valor mínimo de las tasas de generación de paquetes de los usuarios secundarios en todas las situaciones de operación de la red, de la siguiente manera:

$$k = 1/\lambda_{\min}$$

Y se establece la dependencia entre  $\theta_n$  y  $\lambda_n$  así:

$$\theta_n = k\lambda_n$$

Como en el caso anterior, el objetivo consiste en encontrar el conjunto de valores de tasa promedio (en el tiempo) de aceptación de paquetes desde las capas superiores de los dispositivos de usuario secundario que solucionen de forma óptima los problemas de optimización que conforman el algoritmo *CNC*. Este objetivo se logra de forma aproximada con la utilización del algoritmo *Greedy Maximal Match Scheduling* para la asignación de recursos desde la operación conjunta con las políticas de control de flujo definidas.

### 2.2.3. Análisis alternativo de equidad desde la perspectiva Max-Min Fairness

En este punto se presenta un planteamiento basado en los conceptos de optimización *Max-Min Fairness* que busca establecer un análisis de equidad en los procesos de asignación de recursos sobre los escenarios de red descritos.

De acuerdo con los problemas de optimización que define el algoritmo *CNC*, en este caso se tiene como objetivo encontrar la solución que maximice el valor mínimo de *throughput* garantizado a los usuarios secundarios. Para ello, en adición a las dinámicas de encolamiento que se presentan en [8], se define una nueva cola virtual de paquetes descartados  $\delta_n$  (para el usuario secundario  $n$ ), que da cuenta del número de paquetes no admitidos a la capa de red por los usuarios secundarios. Esta dinámica de encolamiento virtual está dada por:

$$\delta_n(t+1) = \max[\delta_n(t) - \rho_{\delta_n} + (A_n(t) - R_n(t)), 0]$$

En (3),  $(A_n(t) - R_n(t))$  indica el número de paquetes descartados por el usuario secundario  $n$  en la ranura de tiempo  $t \cdot P_{\delta_n}$  (paquetes/intervalo de tiempo) da cuenta de la tasa máxima de paquetes descartados. Lo anterior es similar a la dinámica de encolamiento de único servidor para la cola de colisión de los canales primarios definida en [8], con tasa de atención  $\rho_m$ .

En este caso, los procedimientos de control de flujo son efectuados similarmente a lo establecido en la parte de control de flujo del algoritmo *CNC* de [8]. El proceso de asignación de recursos, usando la nueva estadística de paquetes perdidos, parte del siguiente objetivo de optimización:

$$\text{Max: } \sum_{n,m} \mu_{nm}(t) [(U_n(t) + \delta_n(t) I_{\{U_n(t) > 0\}}) P_m(t) - X_m(t)(1 - P_m(t))] \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\mu_{nm}(t) \in \{0, 1\} \quad \forall n, m \quad (5)$$

$$\mu_{nm}(t) \leq h_{nm}(t) \quad \forall n, m \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_{m=1}^M \mu_{nm}(t) \leq 1 \quad \forall n \quad (7)$$

$$0 \leq \sum_{n=1}^N \mu_{nm}(t) \leq 1 \quad \forall m \quad (8)$$

Estas expresiones configuran el problema de optimización que debe solucionar el mecanismo de asignación de  $M$  canales primarios a  $N$  usuarios secundarios desde los criterios *Max-Min Fairness*. Particularmente, las expresiones (5), (6), (7) y (8) dan cuenta de las restricciones impuestas a la asignación de recursos, denotada por la matriz  $\mu_{nm}(t)$ , para el caso en el que los canales primarios son ortogonales en frecuencia o espacio. Estas restricciones establecen que los canales deben ser asignados únicamente a los usuarios secundarios que pueden accederlos desde su ubicación geográfica y aseguran que un único canal es concedido a un único usuario secundario por intervalo de tiempo.

El factor  $I_{\{U_n(t)>0\}}$  es una función indicadora que toma el valor de 1 cuando existen efectivamente paquetes en la cola  $U$  (en el intervalo de tiempo  $t$ ) para ser transmitidos, permitiendo la operación de la cola virtual de paquetes descartados. Esta cola lleva el registro de los paquetes desechados por las políticas de control de flujo de cada usuario secundario cuando sus colas de capa de red han alcanzado su capacidad de aceptación de paquetes. Si bien las políticas de asignación de recursos de la propuesta original en [8] dan prioridad a los usuarios con alta congestión en la cola de capa de red, con la introducción de la cola virtual de paquetes perdidos  $\delta_n(t)$ , los criterios de asignación pueden establecer de mejor manera los usuarios con peores condiciones de transmisión para priorizar sobre ellos la asignación de canales en los siguientes intervalos de tiempo.

Ahora bien, cuando la cola de capa de red está vacía, la función  $I$  toma el valor de 0. En tal caso, el problema de asignación de recursos es efectuado desde el esquema original de maximización del *throughput* total de la red de usuarios secundarios.

## 2.3. Otras consideraciones sobre el modelo desarrollado

En esta subsección se presentan anotaciones adicionales sobre algunos procedimientos y variaciones incluidas en el modelo propuesto.

### 2.3.1. Modelo de movilidad de los usuarios secundarios

A diferencia de lo mostrado en [8], las simulaciones que se presentan en este artículo utilizan un esquema tipo *Markovian Restricted Random Walk* para modelar el movimiento de los usuarios secundarios, de tal manera que se pueda lograr mayor semejanza con el movimiento normal que exhiben los suscriptores de un sistema celular. Para ello se utiliza el modelo *Markovian Random Walk* convencional y se establece una mayor probabilidad a la dirección de movimiento que continúa la dirección de movimiento anterior. Así, cada usuario secundario tiene una probabilidad

$1 - \beta$  de permanecer en su posición, una probabilidad  $3\beta/4$  de continuar en la dirección en la que se dio el movimiento anterior, una probabilidad  $\beta/8$  de moverse en las direcciones perpendiculares a la del movimiento anterior, o una probabilidad 0 de moverse en el sentido totalmente contrario.

Otra diferencia sustancial del modelo de movilidad que se utiliza en el nuevo ambiente GSM + DVB-T es el rango de movimiento. Si bien en el caso de la propuesta original cada usuario secundario se mueve de una celda a otra de un solo salto por ranura de tiempo, en los nuevos escenarios los usuarios se mueven en un pequeño porcentaje del radio en cada celda de cobertura. Esto significa que cada una de las celdas de cobertura de la red primaria GSM + DVB-T se subdivide imaginariamente en un gran número de pequeñas regiones cuadradas, cuyos lados representan una fracción de las dimensiones de la celda, y los usuarios se mueven en un entorno similar al de las simulaciones del modelo original.

### 2.3.2. Procesos de llegada de paquetes y esquemas de requerimientos no uniformes

En los escenarios GSM y GSM + DVB-T, los usuarios secundarios generan paquetes en sus capas superiores de acuerdo a una distribución de *Poisson*, desde un esquema de llegada de peticiones que evoluciona de acuerdo a un proceso de *Poisson*, a diferencia del proceso independiente de *Bernoulli* del modelo original. Así, los dispositivos de usuario secundario reciben un número aleatorio de paquetes (que puede ser mayor que 1) en su capa de transporte por ranura de tiempo, pero moldeado por un proceso poissoniano con media  $\lambda$  (tasa de llegada de paquetes original) durante todo el tiempo.

Este esquema poissoniano de generación de paquetes de usuario secundario es más realista y atiende de una mejor manera al comportamiento cambiante de comunicación de los radios cognitivos, pues las características de generación de datos de las aplicaciones soportadas en sus capas superiores y sus condiciones de radio son altamente variantes: el número de paquetes generados en la mayoría de ranuras de tiempo responde a un mismo valor dictado por la tasa de llegada  $\lambda$ , pero en algunas ranuras de tiempo se genera un número menor de paquetes y en algunas otras se genera un número mayor.

### 3. Simulaciones y resultados

En esta sección se presentan las consideraciones, suposiciones y parámetros de configuración para las simulaciones correspondientes a la aplicación de las propuestas descritas. Además, se muestran resultados de congestión total promedio y *throughput* promedio para el esquema de asignación de recursos que maximiza el *throughput* total de la red de usuarios secundarios en el ambiente de red primaria heterogénea GSM + DVB-T. Para el criterio de asignación de recursos proporcionalmente a los requerimientos de cada usuario secundario se exhiben resultados de congestión por usuario y porcentaje de tráfico cursado por usuario secundario en el escenario de red primaria heterogénea GSM + DVB-T. Finalmente, sobre los resultados de tráfico cursado por usuario secundario en un escenario heterogéneo extremo GSM + DVB-T, se realiza el análisis de los niveles de equidad alcanzados en los procesos de asignación de recursos según los criterios de maximización del *throughput* total y *Max-Min Fairness* (usando dinámicas de encolamiento virtuales de paquetes perdidos).

#### 3.1. Maximización del *throughput* total de la red de usuarios secundarios

El escenario heterogéneo GSM + DVB-T utilizado para la construcción de la simulación considera 9 celdas GSM distribuidas uniformemente por la región de cobertura total rectangular y 2 celdas DVB-T que no se solapan (esquema de operación *MFN*), como se muestra en la Figura 1. Cada una de las celdas GSM tiene 12 canales frecuenciales primarios que pueden ser utilizados para las transmisiones de los usuarios secundarios desde la explotación de las oportunidades espectrales en los diferentes intervalos de tiempo. Las estadísticas de transición de estados de ocupación de estos canales GSM (probabilidad de cambio de ocupación a desocupación  $P_{od}$  y su contraria  $P_{do}$ ), que modelan los procesos de ocupación de los recursos por parte de los usuarios primarios, son las que se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Probabilidades de transición de estados de ocupación de las portadoras de radio de una celda GSM

No. portadora de radio	$P_{do}$	$P_{od}$
1	$5.0 e^{-1}$	0
2	$5.9 e^{-2}$	0
3	$2.8 e^{-2}$	0
4	$1.8 e^{-2}$	0
5	$1.9 e^{-2}$	$2.0 e^{-6}$
6	$1.8 e^{-3}$	0
7	$1.2 e^{-2}$	$1.2 e^{-5}$
8	$1.1 e^{-2}$	$3.0 e^{-5}$
9	$9.9 e^{-3}$	$1.8 e^{-4}$
10	$4.7 e^{-3}$	$6.1 e^{-4}$
11	$1.9 e^{-3}$	$1.3 e^{-3}$
12	$5.2 e^{-4}$	$2.1 e^{-3}$

La celda DVB-T que cubre la esquina inferior derecha de la región rectangular total tiene únicamente 1 canal libre todo el tiempo, de acuerdo con lo mencionado en la sección anterior. Por su parte, la celda DVB-T cuya región de cobertura se sitúa en la esquina superior derecha tiene 2 canales primarios libres todo el tiempo para acceso de los usuarios secundarios. La tasa de salida de la dinámica de encolamiento virtual de colisiones para los canales primarios (GSM) tiene un valor de 0.1.

El número de usuarios secundarios dentro del escenario heterogéneo de simulación es 96 (producto de 8 usuarios del escenario de simulación de [8] y 12 canales por celda GSM). Estos usuarios se mueven dentro de la región de cobertura total utilizando un modelo *Restricted Markovian Random Walk*, con un valor de 0.9 en la probabilidad  $\beta$  de moverse de una cuadrícula de subdivisión de celda a otra. Cada usuario genera nuevos paquetes según una distribución de *Poisson*, con valor de media  $\lambda$  común para toda la red de radios cognitivos. El parámetro de peso  $\theta$  es unitario para todos los usuarios no licenciados.

Las decisiones de control de flujo y de asignación de recursos se implementan de igual manera que en el escenario de simulación de [8], asegurando que se entrega

como máximo un canal por intervalo de tiempo de simulación a cada uno de los usuarios secundarios que resulten seleccionados con la operación del algoritmo *Greedy Maximal Match Scheduling*.

En la Figura 2 se muestran los comportamientos de la congestión total promedio (promedio de la longitud de las colas reales de capa de red de los usuarios secundarios) y de *throughput* promedio (promedio del tráfico cursado por los usuarios no licenciados) contra la tasa de generación de paquetes  $\lambda$  de los usuarios secundarios para diferentes valores del parámetro de control de flujo  $v$  (1, 2, 5, 10, 100 e  $\infty$ ). Cada uno de los puntos que componen las curvas de los gráficos mostrados en la figura responde a una simulación sobre 500.000 intervalos de tiempo.

Figura 2: Resultados de maximización del *throughput* total de la red de usuarios secundarios

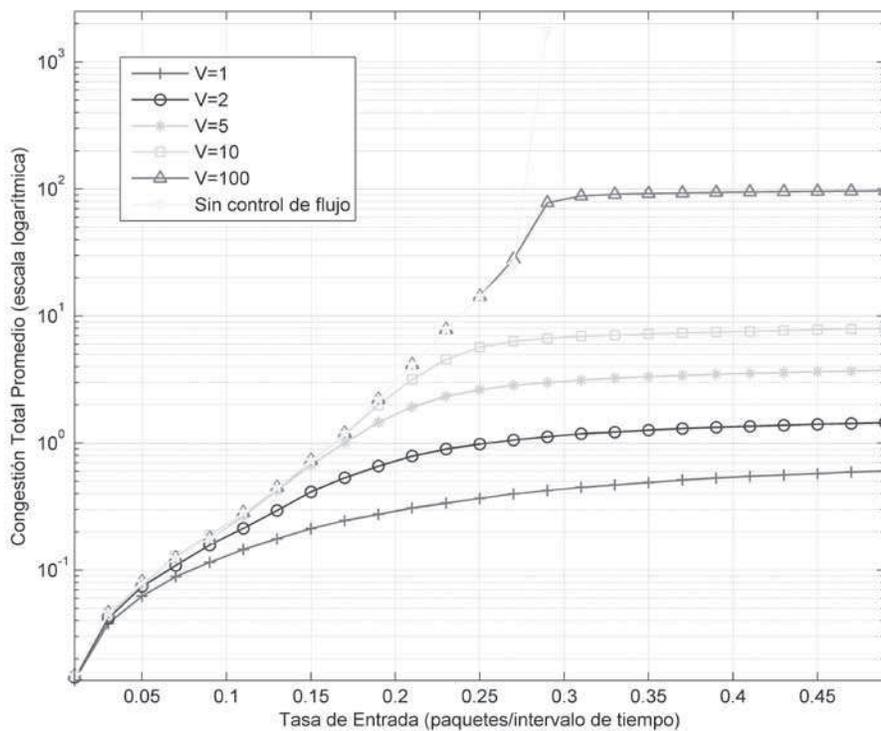


Figura2a (a) Congestión total promedio Vs.  $\lambda$  para diferentes valores de  $v$

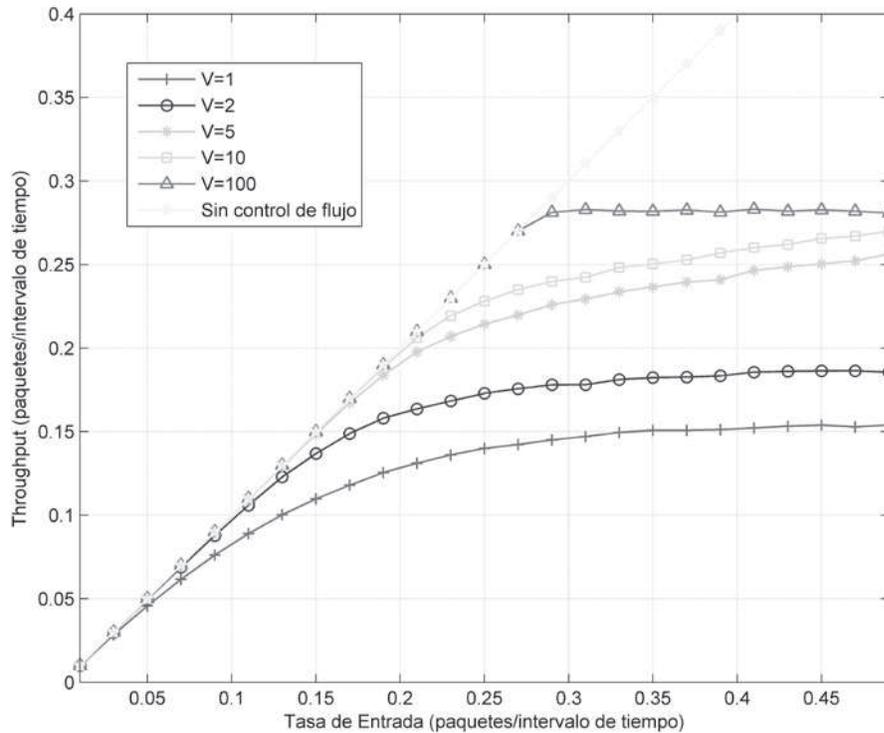


Figura2b (b) *Throughput* promedio Vs.  $\lambda$  para diferentes valores de  $v$

En general, se observa que la tendencia de los resultados de congestión total promedio y de tráfico cursado promedio son altamente similares al comportamiento de los mismos parámetros en [8]. En este caso, sin presencia de los criterios de control de flujo ( $v = \infty$ ), la ocupación total promedio que se muestra en el gráfico (a) crece asintóticamente sin cota para el valor aproximado de tasa de entrada  $\lambda = 0.29$  paquetes/intervalo de tiempo. Este punto da cuenta de un nivel de congestión coincidente con el valor de capacidad máxima de la red.

En el gráfico (b) se exhibe el comportamiento del tráfico cursado para distintas tasas de generación de nuevos paquetes. Particularmente, el *throughput* alcanzado es bastante cercano al valor de tráfico generado para cantidades pequeñas de  $\lambda$ , y se satura en un valor que depende de  $v$ , al igual que en [8]. Cuando  $v$  es grande, el valor de saturación del *throughput* es similar a la cantidad de datos generados por intervalo de tiempo con comportamiento asintótico del gráfico (a), indicando una saturación casi completa de las colas de capa de red de los usuarios secundarios. Se presenta también la curva de  $v = \infty$ , donde existe una ausencia de los criterios de control de flujo y todos los paquetes generados son aceptados en la capa de red de los dispositivos de radio cognitivo para ser transmitidos en intervalos de tiempo posteriores. En tal situación, el crecimiento lineal desmesurado del tráfico a ser

cursado por la red es paralelo al aumento del retardo sufrido por los paquetes en las colas de capa de red.

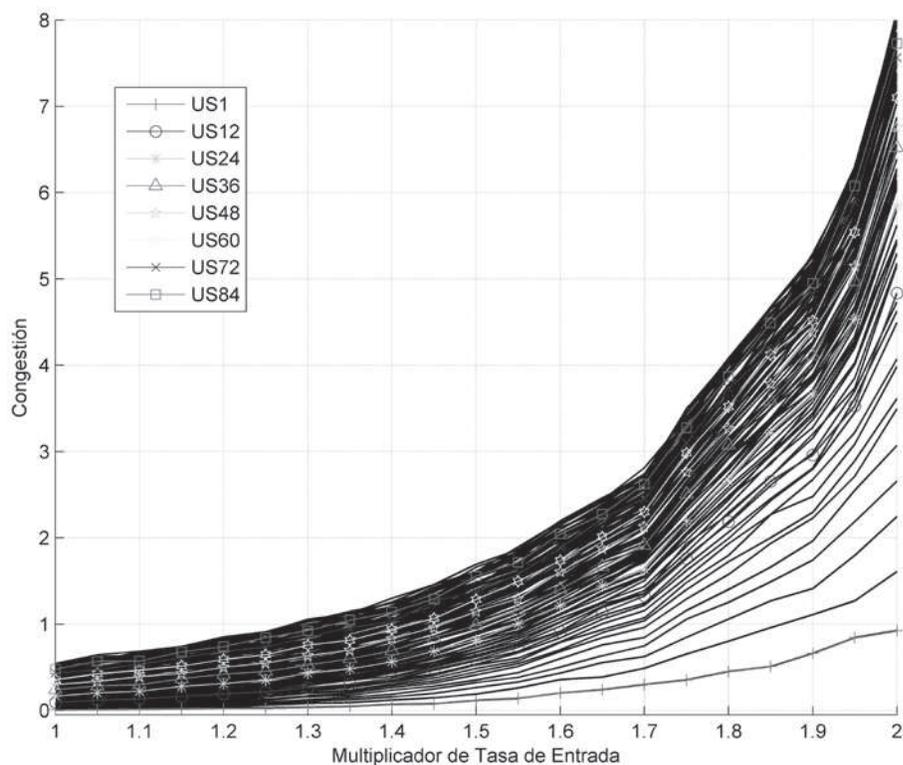
### 3.2. Maximización del *throughput* total mediante la asignación proporcional a los requerimientos de los usuarios secundarios

Las consideraciones y parámetros de configuración de la simulación que realiza una asignación de recursos proporcional a los requerimientos de comunicación de cada usuario secundario (*Proportional Fairness*) para el escenario heterogéneo GSM + DVB-T, son iguales a los asumidos en la subsección anterior. En este caso, sin embargo, los valores de tasa de generación de nuevos datos en las capas superiores son diferentes para cada usuario secundario, ajustando inicialmente una cantidad particular en el rango de  $\lambda$  entre 0 y 0.22 paquetes/intervalo temporal. De esta forma, el primero de los 96 usuarios tiene un  $\lambda$  inicial 0.0023, el segundo de 0.0046, el tercero de 0.0069, y el último de 0.22. Esta diferencia entre los valores de tasa de entrada de los usuarios secundarios se mantiene para todas las situaciones de simulación.

Los procesos de control de flujo son realizados teniendo en cuenta la proporcionalidad entre el parámetro de peso  $\theta$  y la tasa de generación de nuevos datos  $\lambda$  de cada usuario secundario. El procedimiento de asignación de recursos es efectuado con el algoritmo *Greedy Maximal Match Scheduling*, como en la simulación de la subsección anterior.

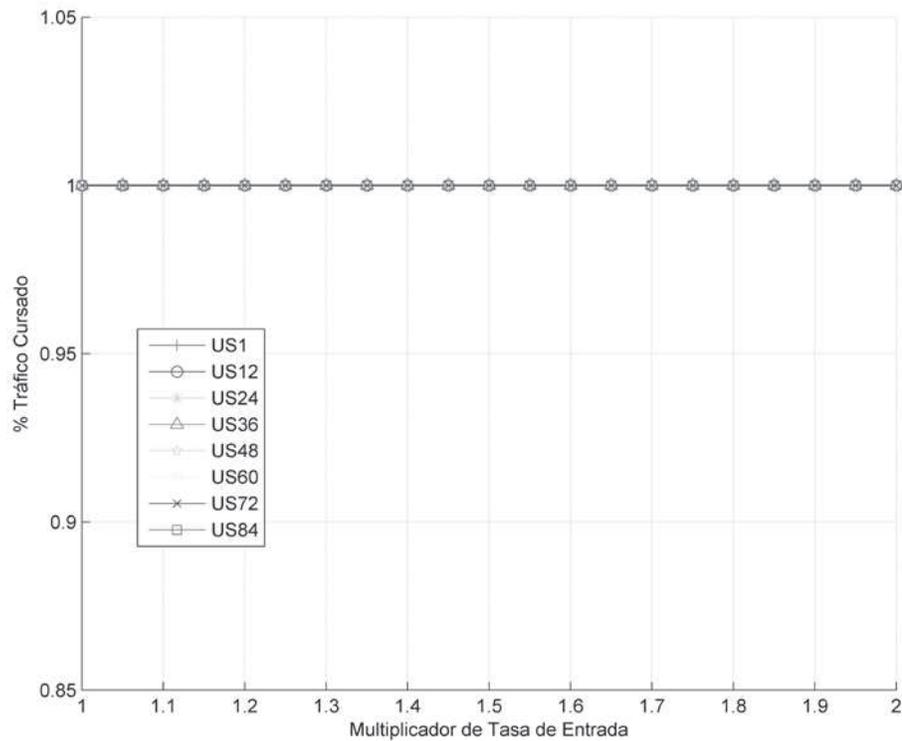
La Figura 3 presenta los resultados de congestión por usuario secundario contra un factor de amplificación de la tasa inicial de generación de paquetes. Las diferentes curvas, cuyos puntos de datos representan un promedio sobre 500.000 intervalos temporales de simulación, muestran la tendencia de ocupación de cada usuario secundario (líneas negras) para el parámetro de control de flujo  $\nu = 10$ . Se resalta el comportamiento de congestión de algunos usuarios secundarios (US1, US12, US24, US36, US48, US60, US72 y US84), exhibiendo que el tamaño de las colas de paquetes crece independientemente sin cota por una ausencia implícita de las políticas de control de flujo en cada dispositivo de la red. Este hecho se debe a la inclusión de los criterios de asignación proporcional, pues a mayor valor de  $\lambda$  por usuario, mayor es la capacidad de las colas de capa de red dictada por el parámetro de peso  $\theta$ .

Figura 3: (Asignación de recursos tipo *Proportional Fairness*) Congestión por usuario secundario vs. multiplicador de tasa de entrada



En la Figura 4 se muestra el porcentaje de tráfico cursado (el tráfico cursado dividido por el tráfico generado) por cada usuario secundario contra el valor de multiplicación de la tasa de entrada de paquetes a las capas de transporte para  $V = 10$ . Se observa que para todas las tasas de generación de paquetes, el porcentaje de *throughput* es 100% en todos los usuarios secundarios, dando cuenta de una asignación de recursos completamente proporcional a los requerimientos de comunicación de cada dispositivo de la red de radios cognitivos.

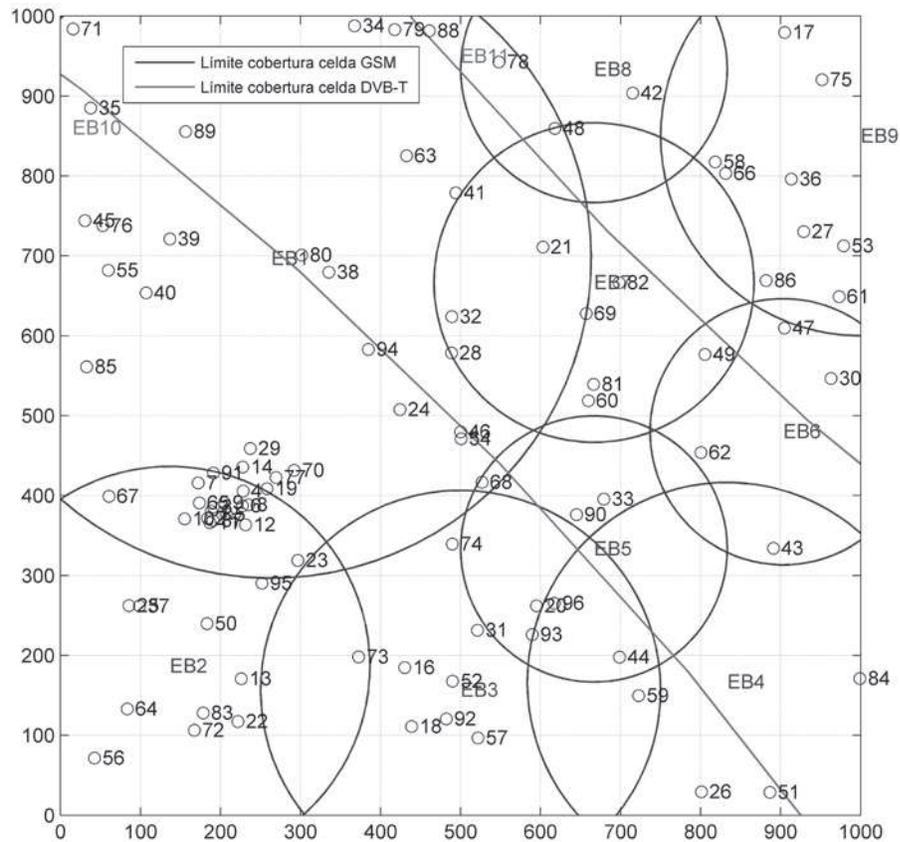
Figura 4: (Asignación de recursos tipo *Proportional Fairness*) Porcentaje de *throughput* por usuario secundario vs. multiplicador de tasa de entrada



### 3.3. Criterios de asignación *Max-Min Fairness* y análisis de equidad

Con el objetivo de efectuar un análisis de los niveles de equidad en los procesos de asignación de recursos, se establece en esta subsección un escenario de competición heterogéneo extremo GSM + DVB-T. Se realiza una distribución homogénea de los usuarios secundarios por toda la región de cobertura total y se mantienen sus posiciones fijas para todo el tiempo de simulación (evitando enmascaramiento de las cantidades de análisis por efecto del movimiento de los usuarios y el cálculo de valores promedio en el tiempo), como se muestra en la Figura 5.

Figura 5: Esquema de cobertura de escenario extremo GSM + DVB-T



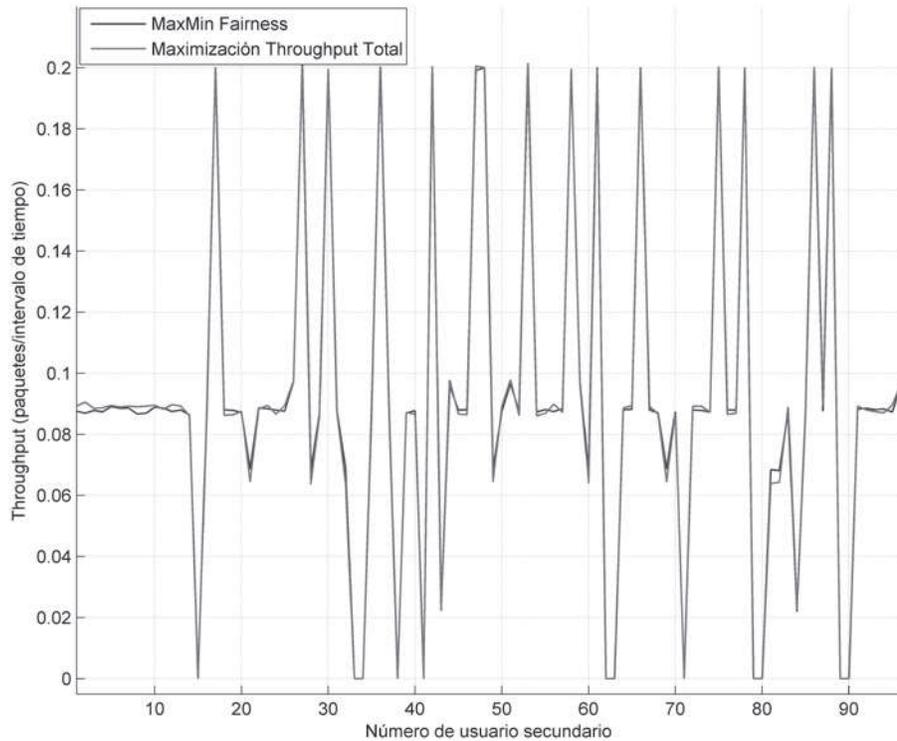
El número de canales primarios disponibles para la explotación de las oportunidades espectrales de las diferentes celdas de este escenario heterogéneo extremo es respectivamente 3, 10, 8, 10, 6, 3, 11, 8, 5, 1, 2 (celdas EB1, EB2, EB3, EB4, EB5, EB6, EB7, EB8, EB9, EB10, EB11 de la Figura 5).

El proceso de asignación de recursos *Greedy Maximal Match Scheduling* se lleva cabo con la inclusión de las dinámicas de encolamiento virtuales de paquetes perdidos en la función de pesos de (4). Las políticas de control de flujo y las demás suposiciones y parámetros de configuración de la simulación son los usados en la subsección 3.1.

La Figura 6 presenta el valor de *throughput* alcanzado por cada usuario secundario en el escenario heterogéneo extremo para una tasa de generación  $\lambda = 0.2$  paquetes/intervalo de tiempo y un valor de 10 en el parámetro de control de flujo  $V$ . Se incluye

una curva de tráfico cursado por los usuarios secundarios al utilizar criterios de asignación de recursos con inclusión de las dinámicas de encolamiento de paquetes perdidos (tipo *Max-Min Fairness*) y una curva de *throughput* alcanzado por cada usuario secundario al usar las políticas de concesión de canales de maximización del *throughput* total de la red. Para ambos criterios, los valores de tráfico cursado por los usuarios secundarios son bastante similares, indicando un nivel de equidad comparable.

Figura 6: (Análisis de equidad) *Throughput* por usuario secundario ( $\lambda = 0.2$  y  $V = 10$ )



Un análisis cuantitativo de los grados de equidad alcanzados en los procesos de asignación de recursos (con colas virtuales de paquetes perdidos y basado en la maximización del *throughput* total) es realizado usando el indicador de equidad de *Jain* [20]. Este índice, dado por (9), da cuenta del porcentaje de semejanza entre los niveles de recursos asignados a  $n$  diferentes entidades que compiten por ellos.

$$J(\vec{x}) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

El valor del índice de *Jain* para las cantidades de *throughput* alcanzadas por todos los usuarios secundarios es 73.2972% con el esquema de asignación de recursos que maximiza el *throughput* total de la red, y es 73.5034% para el esquema de asignación de recursos que tiene en cuenta las colas virtuales de paquetes perdidos. Estos valores del indicador de *Jain* superiores al 70% evidencian un alto desempeño en los procesos equitativos de asignación de recursos con maximización del *throughput* total de la red de usuarios secundarios y con inclusión de las colas virtuales de paquetes perdidos en el entorno de heterogeneidad de cobertura y condiciones de radio de los diferentes dispositivos secundarios del escenario extremo GSM + DVB-T.

Ahora bien, para realizar un análisis de equidad en un ambiente donde los usuarios compiten por los mismos recursos (con las mismas condiciones de comunicación para un estudio realmente apropiado de equidad) se toman los primeros 12 usuarios secundarios, ubicados en la región de solapamiento de las celdas EB1, EB2 y EB10 de la Figura 5, y se calcula el índice de equidad de *Jain*. El valor de este indicador, cuando el criterio de asignación de recursos está basado en la utilización total del sistema (maximización de *throughput* total), es 99.9949%. Para el esquema de asignación de recursos con las colas virtuales de paquetes descartados, el valor del indicador de *Jain* es 99.9958%. Estas magnitudes evidencian que tanto el esquema de asignación de la propuesta original de [8] como el basado en las dinámicas de encolamiento virtuales de paquetes descartados presentan un comportamiento de concesión de recursos completamente equitativo.

## 4. Conclusiones

En este artículo se presentan las extensiones del modelo de *OSA* de Uргаonkar y Neely [8] para su implementación en un escenario heterogéneo más realista GSM + DVB-T, proponiendo criterios de asignación de recursos más justos en determinados ambientes. Se muestran resultados de ocupación y de tráfico cursado por la red de usuarios secundarios que dan cuenta de un alto nivel de desempeño de la aplicación de las propuestas originales y sus extensiones en escenarios con coexistencia de diferentes sistemas de red primaria.

El esquema de asignación de recursos tipo *Proportional Fairness* aquí planteado garantiza una concesión de canales de forma proporcional a los requerimientos de comunicación de cada usuario secundario, asegurando una correcta aplicabilidad de las propuestas en entornos con aplicaciones de usuario diversas. La introducción de los criterios de asignación de recursos basados en las dinámicas de encolamiento virtuales de paquetes descartados (buscando un esquema *Max-Min Fairness* de asignación) logra porcentajes de equidad significativamente altos (incluso en escenarios donde los usuarios no comparten un conjunto común de recursos), al igual que los criterios originales de maximización del *throughput* total de la red de usuarios secundarios.

## Referencias

---

- [1] Q. Zhao y A. Swami, “A survey of dynamic spectrum access: Signal processing and networking perspectives”, in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (MEMS’97), 2007, pp. 1349-1352.
- [2] Q. Zhao y B. Sadler, “A survey of dynamic spectrum access: Signal processing, networking, and regulatory policy”, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, pp. 79-89, mayo 2007.
- [3] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, y S. Mohanty, “Next generation/ dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey”, Computer Networks Journal (Elsevier), vol. 50, n.º 13, pp. 2127–2159, septiembre 2006.
- [4] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, y S. Mohanty, “A survey on spectrum management in cognitive radio networks”, IEEE Communications Magazine, vol. 46, n.º 4, pp. 40-48, 2008.
- [5] P. Pawelczak y otros, “State of the art in opportunistic spectrum access medium access control design”, in Proc. IEEE International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom), mayo 2008, pp. 1-6.
- [6] J. Gao, H. A. Suraweera, M. Shafi, y M. Faulkner, “Channel capacity of a cognitive radio network in gsm uplink band”, in Proc. IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies, octubre 2007, pp. 1511-1515.
- [7] D. Willkomm, S. Machiraju, J. Bolot, y A. Wolisz, “Primary user behavior in cellular networks and implications for dynamic spectrum access”, IEEE Communications Magazine, vol. 47, n.º 3, pp. 85-95, marzo 2009.
- [8] R. Urgaonkar y M. Neely, “Opportunistic scheduling with reliability guarantees in cognitive radio networks”, in Proc. IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2008, pp. 1301-1309.
- [9] Y. Pan y W. Li, Resource Allocation in Next Generation Wireless Networks (Wireless Networks and Mobile Computing). USA: Nova Publishers, 2006.
- [10] G. Heine, Gsm Networks: Protocols, Terminology, and Implementation. USA: Artech House, 1999.
- [11] PLMN: SBS BR8.0 Radio Network Parameters for GSM. Siemens Training Course Documentation, SIEMENS AG., 2005.
- [12] PLMN: SBS BR8.0 Radio Network Planning for GSM. Siemens Training Course Documentation, SIEMENS AG., 2006.
- [13] F. Ahmed, “Dynamic channel allocation in gsm networks”, M. Eng. thesis, Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Suecia, 2008.

- [14] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*. USA: Prentice Hall PTR, 1996.
- [15] A. Mawjoud. (2007) Evaluation of power budget and cell coverage range in cellular gsm system. [En línea]. Disponible en: <http://alrafidain.engineering-coll-mosul.com/files/182.pdf>
- [16] H. Zhang. Gsm 1800 radio network planning for a metropolitan region. [En línea]. Disponible en: [http://www.comlab.hut.fi/ARG/hzhang/GSM\\_radio%20network %20planning.doc](http://www.comlab.hut.fi/ARG/hzhang/GSM_radio%20network%20planning.doc)
- [17] J. Huschke, W. Rave, y T. Kohler, "Downlink capacity of umts coexisting with dvb-t mfn and regional sfns", in *Proc. IEE Getting the Most Out of the Radio Spectrum Conference*, 2002.
- [18] G. Faria. Dvb-rect : The missing link for digital terrestrial tv. [En línea]. Disponible en: [http://www.teamcast.eu/data/upload/files/BIBFILE\\_FILE\\_J5RnK3d.pdf](http://www.teamcast.eu/data/upload/files/BIBFILE_FILE_J5RnK3d.pdf)
- [19] Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects, ETSI Std. ETSI TR 101 190 V1.3.1, 2008.
- [20] R. Jain, D. M. Chiu, y W. Hawe. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system. [En línea]. Disponible en: <http://www.cs.wustl.edu/~jain/papers/ftp/fairness.pdf>

