



ALGORITMO DE SCHEDULING M-LWDF

SIMULACIÓN PARA LA PROVISIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO EN ENTORNOS MULTIUSUARIO CON CANALES VARIANTES.

José Antonio López Salcedo¹, Daniel Prado Rodríguez²,
Raül Tornay, Andreu Urruela Planas

Estudiantes de la E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona (UPC)

^{1,2}Miembros de la Rama de Estudiantes del IEEE de Barcelona

Email: {jose25@casal.upc.es, daniel25@casal.upc.es, rault@yahoo.es, andreu@gps.tsc.upc.es}

Resumen - En sistemas de transmisión de alta velocidad en canales *wireless*, donde el espectro es un recurso altamente limitado, se hace necesaria la implementación de algoritmos de reparto de los recursos si se pretende cumplir con unos determinados requerimientos en términos de tasa de transmisión o de retardo máximo de los paquetes. El presente artículo pretende mostrar cómo los algoritmos de *Scheduling* (y en particular el algoritmo M-LWDF) pueden ofrecer mejores prestaciones en términos de tasa media de transmisión respecto a los algoritmos tradicionales de reparto de recursos, los cuales no suelen prestar atención a las circunstancias individuales que presentan los diferentes usuarios del sistema.

1.- INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más significativos de las comunicaciones móviles 3G es la alta variabilidad de la capacidad del canal que llega incluso a sufrir grandes variaciones de forma aleatoria en un intervalo relativamente pequeño (de algunos tiempos de slot). De hecho, en este nuevo tipo de comunicaciones móviles, la velocidad de transmisión (a la que también nos referiremos como *capacidad* o *rate*) está discretizada a un conjunto finito de valores, los cuales pueden ser escogidos en función de la calidad del canal que ha estimado el sistema.

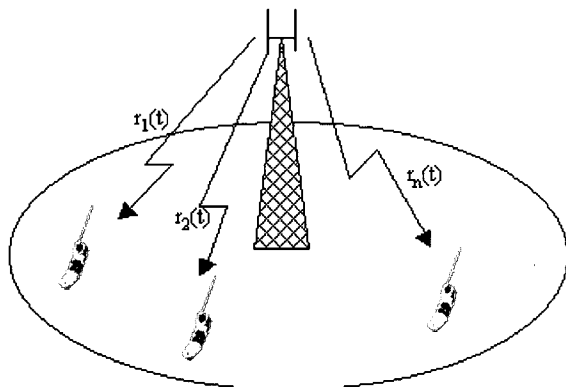


Fig. 1.1. Canal *downlink* compartido por *n* usuarios a diferentes rates instantáneos.

De este modo, por ejemplo, en un sistema monousuario los rates de transmisión elegidos se ven obligados a seguir irremediablemente las fluctuaciones del canal, ya que dichos rates o tasas de transmisión son fijadas directamente

por la calidad de canal observada. Por tanto, la tasa media a la cual se podrán cursar paquetes será irremediablemente la media de la distribución estadística de la capacidad del canal.

Por otro lado, en un sistema donde varios usuarios comparten el mismo recurso, éstos se ven obligados a repartirse el tiempo disponible para poder transmitir por el mismo canal. Parece entonces razonable que para cada usuario se pueda elegir o programar (en inglés, *schedule*) los instantes para transmitir en que la estimación de la calidad de su canal sea mejor. De esta forma, dado que cada usuario tendría, dentro de lo posible, sus mejores instantes para transmitir, la tasa media de transmisión de cada usuario sería superior a la media estadística de la capacidad de su canal, es decir, superior a la que habría conseguido si hubiera transmitido tanto en los instantes donde la calidad de su canal era buena como en los instantes donde esta calidad era mala.

1.1 Ejemplo

Un ejemplo que muestra la mejora en términos de tasa media de transmisión tras aplicar algún tipo de algoritmo de asignación de canal que tenga en cuenta la calidad del mismo se presenta en [1], considerando un sistema simple de dos usuarios. El rate en un slot temporal para el usuario 1 es de 76.8 kbps o bien 153.6 kbps, de manera equiprobable, mientras que el usuario 2 presenta unos rates de 156.6 kbps o bien 307.2 kbps, también equiprobables. Además, la estadística del canal para ambos usuarios es independiente, y la cantidad de datos a transmitir es ilimitada. Aplicando un criterio de asignación en que en cada slot temporal se cambia de usuario servido, el rate medio resultante para cada usuario sería de:

$$R_1 = 0.5 \cdot (0.5 \cdot 76.8 + 0.5 \cdot 153.6) = 57.6 \text{ kbps}$$

$$R_2 = 0.5 \cdot (0.5 \cdot 156.6 + 0.5 \cdot 307.2) = 115.2 \text{ kbps}$$

Sin embargo, aplicando un criterio de asignación de *justa proporcionalidad*, el canal es asignado al usuario que presente una tasa de transmisión relativamente mejor en ese instante, de modo que si ambos usuarios se encuentran en empate, la asignación se realiza de manera equiprobable.

La mejora asociada a este nuevo y sencillo criterio de asignación es un incremento de casi un 17 % en la tasa

media de transmisión de cada usuario, lo cual abre unas buenas expectativas para el estudio del Algoritmo de M-LWDF que será llevado a cabo más adelante.

En conclusión, todos y cada uno de los usuarios conseguirían aumentar su tasa media de transmisión, a costa de no transmitir cuando sus capacidades de transmisión fueran bajas (es decir, cuando la calidad de su canal fuera mala) con la esperanza de que en ese mismo instante algún otro usuario tuviera una estimación de canal comparativamente mejor que la nuestra.

2.- ALGORITMO M-LWDF

El algoritmo M-LWDF (*Modified Largest Weighted Delay First*) propuesto en [1] pretende maximizar de manera óptima la tasa de salida de todos los usuarios atendiendo a dos parámetros clásicos de calidad de servicio como son: el retardo máximo permitido y la tasa mínima garantizada. De esta forma pretende ponderar ambos parámetros para decidir a qué usuario se le asigna el recurso compartido.

El modelo que se pretende simular consiste en un canal de bajada o *down-link* compartido de un sistema multi-usuario de conmutación por paquetes. Este esquema podría ser aplicado en general a una gran diversidad de sistemas de telecomunicación, sin embargo el hecho de que la característica del canal pueda variar rápidamente y de manera aleatoria, hará que identifiquemos este esquema en un escenario de comunicaciones móviles con tasa de transmisión variable.

En este entorno, cada uno de los usuarios dispone en la estación base de un cola o *buffer* donde se almacenan los paquetes que llegan con una cierta distribución de tráfico y tasa de entrada, y así poder ser posteriormente transmitidos al terminal móvil cuando se tenga la oportunidad. Estas colas se supondrán infinitas, puesto que el objetivo del estudio será propiamente el algoritmo inteligente de reparto del canal, el cual será modelado como un *servidor*, tal y como puede apreciarse en la figura 2.1.

Por otra parte, las estimaciones de los canales de los diferentes usuarios serán independientes entre ellos, haciendo que las tasas de transmisión utilizadas sean también independientes. Estas tasas de transmisión serán las que utilizará el algoritmo para determinar el criterio de asignación del canal. Tal y como especifica el nombre del algoritmo, el criterio de asignación se basa en la selección de la cola j que cumpla la relación siguiente:

$$\max_j \{ \gamma_j W_j r_j(t) \}$$

donde W_j representa el tiempo de espera en cola del primer paquete (*Head of Line delay*) o equivalentemente, el número de elementos en cola, y $r_j(t)$ la capacidad actual del canal en función de las estimaciones recibidas por los usuarios, siendo g_j constantes positivas.

Esta ponderación para la asignación del usuario que hará uso del canal pone de manifiesto el compromiso entre el

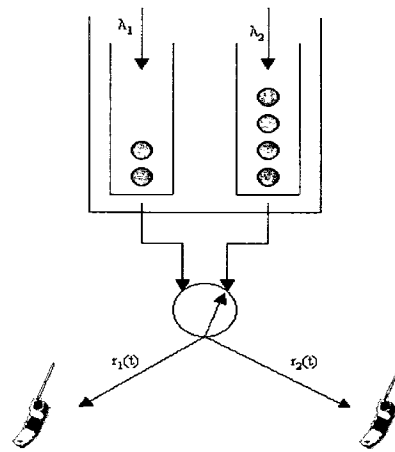


Fig. 2.1. Esquema para el algoritmo M-LWDF del modelo de colas en una celda con dos usuarios.

retardo actual en cola del paquete a servir, con la calidad del canal que se observa. De esta forma, los usuarios con mejor rate (buena calidad del canal) tendrán preferencia sobre los que observan un canal comparativamente peor; por otro lado, si el retardo actual en cola es elevado, el usuario también tendrá preferencia, a pesar que su canal no sea extremadamente bueno. Así pues, dentro de lo que es posible, el algoritmo intentará siempre maximizar el rate de salida. Aún con todo, si las necesidades de retardo máximo lo requieren, el compromiso de la expresión decide cuál de los dos factores reviste de mayor urgencia. Finalmente, el factor de ponderación g_j sirve para ajustar de forma adecuada los diferentes requerimientos de QoS de cada uno de los usuarios.

3.- ESCENARIOS DE CANAL VARIANTE

3.1 Introducción

El canal de comunicaciones es el elemento clave del algoritmo, pues será el que determinará de manera directa la tasa de transmisión disponible para cada usuario, y por tanto determinará el tiempo de servicio con el que el servidor atenderá a cada uno de éstos. Además, la variabilidad de este canal será la que en gran medida defina las prestaciones del algoritmo, pues éste basa su criterio de asignación de usuario mediante el uso del rate instantáneo, el cual seguirá una u otra distribución estadística, haciendo que la evolución del algoritmo difiera en canales con una gran variabilidad de rate, respecto a otros en los que éste apenas sufre fluctuaciones.

En concreto, en un entorno de comunicaciones móviles como el que nos ocupa, la respuesta del canal suele variar de manera aleatoria a lo largo del tiempo, por lo que se hace necesario caracterizarla de forma estadística. Desde el punto de vista de la calidad de la comunicación, en general podemos decir que este tipo de canales penalizan sobre la relación señal-a-ruido en recepción (SNR) a través de diferentes efectos: desvanecimientos, multipath, ensanchamiento temporal o frecuencial de la señal transmitida.

Lejos de buscar un estudio exhaustivo sobre las causas que producen la pérdida de calidad en el canal de comunicaciones, como caso práctico sencillo nos centraremos en el estudio de los desvanecimientos de señal que se producen, pues éstos son modelables de manera simple y se adecúan perfectamente a nuestras necesidades de modelar la variabilidad de la calidad del canal.

3.2 Relación entre SNR y rate

Un aspecto importante a comentar es la relación que estableceremos para, a partir de una cierta distribución de canal que haga variar la SNR, obtener la velocidad de transmisión que puede llegar a conseguirse. Para ello haremos uso de la ecuación que planteó C. Shannon para definir la máxima capacidad de un canal de comunicaciones (bits/s), en función de su ancho de banda y de su relación señal-a-ruido:

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR)$$

De esta forma, el criterio que se seguirá será el de calcular el rate instantáneo para cada usuario a partir de la capacidad de Shannon, la cual hará uso de la estimación de la SNR instantánea del canal de cada usuario en cuestión.

Sin embargo, esta SNR instantánea seguirá una cierta distribución estadística, cuya media tendremos que fijar de alguna manera. Para tener una idea del orden de magnitud en el que nos moveremos, se tomará como caso de ejemplo el sistema de comunicaciones móviles GSM, del cual tomaremos los valores de SNR para un canal equivalente de 10 kbps, el cual tomaremos como ejemplo para simulación. Los parámetros utilizados serán:

- media{SNR} = 24 dB, std{SNR} = 6 - 7 dB
- BWeq = 1.25 kHz

3.3 Tipos de desvanecimientos utilizados

• Escenario con ecos difusos

En este caso, el escenario de propagación consta de un conjunto de ecos denominados difusos, producto de múltiples reflejos multicamino, sin que exista un camino predominante sobre el resto. Ello hace que este escenario se identifique con el caso de comunicaciones móviles en entornos urbanos complejos o interiores, pues la recepción de señal procede de múltiples caminos, todos ellos aproximadamente de igual amplitud pero sin que exista visión directa.

En estas situaciones, la envolvente de la respuesta impulsional del canal presenta una distribución estadística tipo Rayleigh. Sin embargo, nuestro parámetro de interés se basa en la estimación de SNR, la cual procede de la relación entre potencia de señal y ruido. Por ello, en un caso ideal en que se mantuviera constante la potencia de ruido, la potencia de señal se vería afectada por una distribución estadística resultado de elevar al cuadrado la distribución Rayleigh de la envolvente.

El resultado de elevar al cuadrado una distribución de tipo Rayleigh puede aproximarse por una distribución de tipo exponencial, por lo que este primer escenario de ecos difusos (entorno urbano) será simulado mediante el uso de valores de SNR instantáneos correspondientes a una variable aleatoria exponencial de media $10^{2.4} \sim 252$.

Tal y como se ha comentado en el apartado 3.1, los valores instantáneos de SNR serán introducidos en la expresión del cálculo de la capacidad teórica de Shannon, obteniendo de esta forma los rates instantáneos para cada usuario. El inverso de estos valores será el parámetro que utilizará el servidor como tiempo de servicio. Los histogramas correspondientes pueden observarse en las figuras 3.1a y 3.1b.

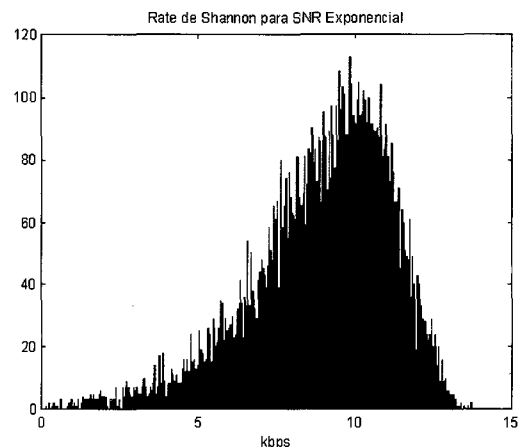


Fig 3.1a Histograma de la capacidad de Shannon para SNR exponencial.

Éste será el peor escenario de simulación, ya que tal y como se observa en la figura 3.1a, hay gran número de realizaciones de rates instantáneos cuyos valores se encuentran bastante por debajo de la media estadística, lo cual indica que hay un gran número de instantes en los que el canal que se observa posee malas condiciones de transmisión.

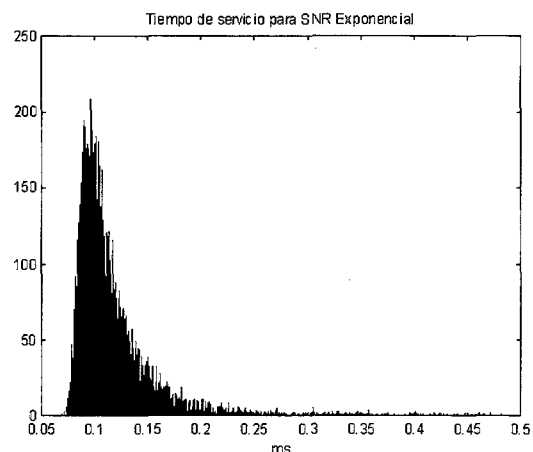


Fig. 3.1b Histograma del tiempo de servicio para una SNR exponencial.

• Escenario con ecos fijos

Este nuevo escenario corresponde a comunicaciones móviles en entornos semi-urbanos, donde existe un camino de propagación o de visión directa predominante, junto con pequeños reflejos multicamino de menor amplitud. En este caso, la envolvente del canal suele modelarse como una distribución de tipo Rice, resultando su cuadrado en una distribución que puede aproximarse de tipo Rayleigh.

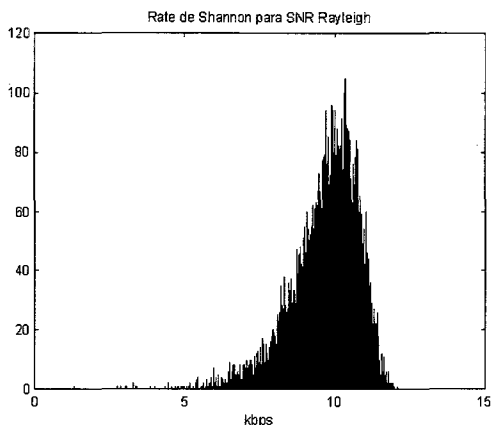


Fig. 3.2a Histograma de la capacidad de Shannon para SNR Rayleigh.

De la observación de las gráficas 3.2a y 3.2b se puede ya predecir que en este escenario los resultados del Algoritmo M-LWDF no serán tan buenos como en el caso anterior de distribución de SNR exponencial, pues los posibles rates quedan más concentrados alrededor de su valor central, de manera que los diferentes usuarios tienen más posibilidades de tener rates parecidos entre ellos. De este modo, los rates de los usuarios serían más uniformes y en algunos casos podría ser difícil poder encontrar algún usuario con un rate instantáneo claramente superior al resto, reduciendo así el margen de maniobra del algoritmo.

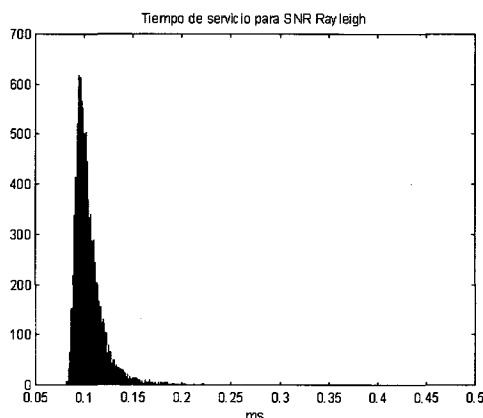


Fig. 3.2b Histograma del tiempo de servicio para SNR Rayleigh.

4.- GENERACIÓN DE TRÁFICO

Resulta de vital importancia el estudio de las prestaciones del algoritmo en presencia de varios tipos de generación

de tráfico puesto que dichos tipos se adaptan a las necesidades presentes en el sector de las comunicaciones móviles. De hecho, no es descabellado suponer que ciertas prestaciones del algoritmo pueden resultar seriamente dañadas por la presencia de cierto tipo de generación que dificulte el correcto funcionamiento del algoritmo.

En los subapartados siguientes se explica brevemente en que consisten tales tipos de generación de datos que serán utilizados en el apartado de simulaciones reales.

• Tráfico exponencial

El sistema de generación más característico en los modelos de las cadenas de Markoff es el conocido sistema de generación exponencial. Básicamente consiste en disponer las llegadas de forma que el tiempo que transcurre entre las sucesivas llegadas es una variable aleatoria exponencial de media el inverso del rate nominal. Como es conocido, la característica más importantes de este tipo de generación heredadas de la naturaleza exponencial de las transiciones es su ausencia de memoria.

• Tráfico IPP

El segundo de los tráficos programados para la adaptación a sistemas reales es el conocido tráfico IPP. Este tráfico pretende adaptarse a las llamadas fuentes a ráfagas. Consiste en generar un tráfico de naturaleza exponencial durante un cierto tiempo y a continuación mantener un período de inactividad. La duración del período de inactividad tiene naturaleza exponencial, y el número de paquetes enviados en el período de actividad se resuelve mediante la utilización de una variable aleatoria discreta de naturaleza geométrica.

5.- ESTUDIO TEÓRICO SOBRE CANAL VIRTUAL

5.1 Introducción

En las secciones anteriores, se ha expuesto tanto el funcionamiento del algoritmo en estudio como las diferentes modelaciones de canales y generadores de tráfico. Si bien en el apartado siguiente, todos estos sistemas serán simulados de forma estricta dando lugar a un estudio sobre la capacidad de tráfico en sistemas reales, en esta sección del trabajo nos gustaría realizar un estudio absolutamente teórico sobre el comportamiento del algoritmo en un escenario totalmente virtual, aún cuando siendo en muchas ocasiones irreales.

Es por ello que el escenario de simulación que expondremos a continuación no tiene porqué coincidir con ningún sistema real, ni es nuestro objetivo justificar tal escenario sino los resultados que de él se obtienen pues ofrecen una visión algo teórica de las prestaciones potenciales de este algoritmo.

5.2 Planteamiento del estudio

Como se ha comentado en la introducción, el sistema se compondrá de N fuentes de generación independiente con tasa λ_i . Toda la generación de paquetes procedentes de estas N fuentes alimentará a un único servidor que buscará la mejor manera de aliviar el tráfico presente a su entrada ofreciendo ciertas prestaciones a todos y cada uno de los usuarios. De hecho la implementación impone la obtención de las mejores prestaciones en términos de retardo en el sistema. Los parámetros a los cuales vamos a estar pendientes son principalmente, el número de elementos en las colas del sistema y el retardo que este provoca sobre las muestras procedentes de los diferentes generadores. Como parámetro complementario, estaremos pendientes, no solo de la media de estos valores sino de algún percentil cuando sea necesario. Por ejemplo, no es sólo interesante estudiar cual es la media del retardo del sistema sino observar cuál fue el valor más alto de retardo descartando un 5 por ciento de las muestras más desfavorables.

Finalmente, tendríamos que definir cuales serán las variables de simulación que nosotros variaremos para poder obtener los resultados prometidos. En primer lugar, el parámetro fundamental a estudiar es la sobrecarga de tráfico que se le puede inyectar al sistema con el fin de ver hasta que punto el algoritmo es capaz de mejorar una implementación clásica. En segundo lugar, está claro que tiene que haber una relación entre tal mejora y la distribución del canal. Parece lógico que tal relación esté íntimamente ligado a la varianza del canal puesto que el canal debe ser variante para que el algoritmo encuentre momentos óptimos para efectuar sus transmisiones. Por tanto resulta muy interesante variar la varianza del canal para observar como se comporta el algoritmo. Finalmente, resulta interesante estudiar cual es el comportamiento del sistema con el aumento del número de usuarios que comparten el canal. De hecho, aumentar el número de usuarios independientes presentes en el sistema es una forma más de aumentar la varianza del canal puesto que al incorporar una nueva distribución independiente del canal, esta aumenta en el concepto general de canal compartido.

Cabe destacar que las simulaciones efectuadas se realizan con un criterio de normalización de forma que el tráfico ofrecido (con o sin sobrecarga) esté normalizado al número de usuarios.

5.3 Modelo simulado

Tal y como se ha comentado en la sección anterior, este estudio teórico ha de permitir modificar la varianza a voluntad para poder estudiar el comportamiento del algoritmo y por simular con diferentes tráficos ofrecidos respecto a la capacidad del canal. Por normalización se ha

trabajado con un servidor de tasa media de salida 10.0 paquetes/u.t. en todas las simulaciones.

Los generadores están programados, durante este estudio teórico, para generar una tasa media conjunto de 10.0 paq/ u.t * OVER_TRAFFIC. Donde OVER_TRAFFIC es el parámetro que controla la sobrecarga de tráfico ofertado. De esta forma, un valor de OVER_TRAFFIC de 1.1 ofrece un 10 por ciento más de paquetes al sistema. Como se comentaba en la sección anterior, el tráfico ofertado al sistema se dividirá en los diferentes generadores con el fin de que la oferta sea independiente al número de usuarios.

Con el fin de poder variar la varianza del canal a voluntad se ha trabajado con una programación del servidor en distribución binomial en torno al valor medio de canal. De esta forma, el rate que el servidor ofrece a cada instante puede tomar dos valores con igual probabilidad. Dichos valores se encuentran a igual distancia del valor nominal de rate: 10.0 paq / u.t. Cabe destacar que a esta distribución se le ha añadido un ruido relativamente pequeño (distribución fig 5.2) para que la política de decisión no eligiera siempre a los elementos procedentes de los primeros generados. Esto es debido a que tal y como está planteado el sistema y dado que el número de elementos en cola siempre es un entero, en caso de empate en la puntuación de asignación de canal, siempre se declaraban ganadores injustamente, los elementos procedentes de los primeros generadores. Añadiendo un pequeño ruido, tal efecto quedaba prácticamente, eliminado. La potencia de ruido añadido es suficientemente poco significativa como para no alterar la varianza de la distribución de canal. Como se puede observar en la figura, el parámetro libre de cambio es la separación de las dos deltas de la distribución para poder aumentar la varianza del sistema. De hecho si tomamos una separación d del centro de la distribución (esto es, las dos deltas están centradas en $10-d$ y $10+d$), la varianza general de la distribución podrá calcularse como indica la ecuación siguiente:

$$\sigma^2 = 0.5[(10-d)-10]^2 + 0.5[(10+d)-10]^2 = 0.5d^2 + 0.5d^2 = d^2$$

La distribución de canal simulada puede corresponder a un sistema donde la capacidad del canal no pueda expresarse de forma analógica o continua sino que el conjunto de valores que puede tomar sea limitado a dos.

5.4 Simulaciones efectuadas

El número de simulaciones realizadas para llevar a cabo este estudio teórico es relativamente elevado dado que para estudiar la dependencia de las prestaciones respecto a un parámetro, se ha de realizar la simulación para un conjunto de puntos de ese parámetro de forma que pueda observarse o predecirse la evolución continua de tal parámetro.

Es por ello que las simulaciones que se han llevado a cabo han consistido en medir el número medio de elementos en cola de cada uno de los generadores entrantes al sistema así como la media del tiempo de permanencia en el sistema

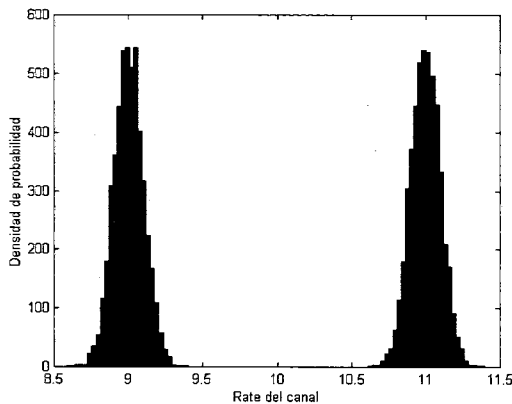


Fig. 5.1 Distribución de canal escogida para el estudio del canal virtual.

y el percentil del mismo (descartando el 5 por ciento de las muestras). Esta extracción de resultados se ha realizado para un número de 2,6,10 o 14 generadores. Finalmente para cada uno de estos escenarios se ha realizado una simulación para un conjunto elevado de valores de la varianza del canal.

En conclusión el número de resultados es relativamente elevado, no siendo tan interesantes los datos en sí, sino un análisis gráfico de los mismos con los comentarios pertinentes. Los resultados pueden ser analizados exhaustiva y detenidamente en el Anexo C. Por el contrario, a continuación se exponen las conclusiones extraídas.

5.5 Conclusiones

5.5.1 Simulación básica

Tomemos el escenario de N (número de generadores presentes en el sistema) igual a diez. Si ofrecemos al sistema el tráfico que es capaz de soportar en media, esto es 10 paq/u.t, observaremos que el sistema no satura como lo haría un sistema de asignación secuencial de recursos. En la figura 5.2 observamos la evolución del número de elementos en cola para diferentes valores de la varianza del canal.

Las conclusiones que se pueden extraer a la vista de los resultados son varias. En primer lugar observamos que si la varianza disminuye radicalmente de valor, el sistema empieza a saturar. Observación que resulta totalmente lógica puesto que si el rate del canal no tiene varianza, el canal se convierte en determinista y, en conclusión, no se puede mejorar la eficiencia del canal por el hecho de asignar mejor los recursos. Dicho de una forma más intuitiva no existen “mejores momentos” para transmitir y “peores momentos” porque todos son iguales. De hecho, cuando disminuimos la varianza nos enfrentamos cada vez más a un sistema M/D/1 y por tanto dicho sistema satura cuando la tasa de entrada coincide con la tasa de salida. Existe por tanto lo que podemos denominar varianza mínima para el correcto funcionamiento. Esto es, el algoritmo necesita una mínima varianza para poder soportar el tráfico que se ofrece al sistema. Dicha varianza mínima

dependerá tanto de la tasa ofrecida como del número de generadores.

En segundo lugar observamos que cuando la varianza del sistema es extremadamente elevada, la sistema también muestra una leve tendencia a la saturación. Esto es debido a que si existen valores de la distribución que provocan un tiempo en el sistema relativamente grande (varianza muy grande indica que hay valores poco probables muy desfavorables), en el momento en que estos sean tomados, el sistema perderá mucho tiempo en transmitir al rate asignado acumulando muestras en las colas de forma exagerada. De esta forma, el sistema en la siguiente asignación se ve más forzado por las exigencias temporales de los elementos acumulados que por sus preferencias de optimización. Dicho de forma más intuitiva el sistema entra en un bucle de desesperación. Ha perdido mucho tiempo en una muestra y eso le lleva a tener que expulsar como sea las muestras acumuladas. Ese “como sea” lleva al sistema a tener que volver a utilizar valores desfavorables de rate de transmisión y así sucesivamente.

5.5.2 Dependencia con el número de generadores

Como se ha comentado en las conclusiones de la simulación básica anterior, la evolución de las prestaciones del sistema (elementos en colas y tiempo medio en sistema), dependen del número de usuarios (o generadores) que intervienen en el problema. De forma intuitiva, si hay un mayor número de usuarios en el sistema, el algoritmo tendrá más diversidad a la hora de elegir el usuario candidato a transmitir. Por el contrario, también es verdad que existen más usuarios con las mismas exigencias de prestaciones con lo cual no estaba tan claro a priori hasta que punto podrían mejorar las prestaciones. Cabe resaltar, que más usuarios no implica más tráfico ofrecido dado que la carga individual es normalizada para que la carga conjunta al sistema sea idéntica a la anterior.

En la figura 5.2 podemos observar cómo evoluciona el número de elementos en cola en función del número de usuarios. A la vista de los resultados expuestos en esta gráfica podemos concluir que el aumentar el número de usuarios favorece al algoritmo dándole mayor margen de maniobra al poder escoger ante más posibilidades. De

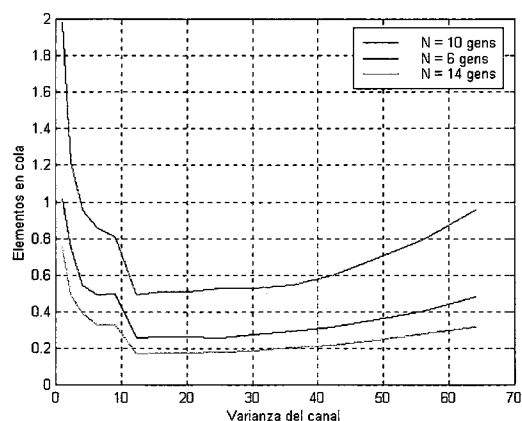


Fig. 5.2 Comparativa del número de elementos en cola.

hecho, la justificación más formal fue la facilitada en la introducción la cual apuntaba a que un mayor número de usuarios equivale a trabajar con un canal común compartido de mayor varianza.

Sin embargo, la comparativa expuesta en la figura anterior, no revela una comparación justa puesto que indica el número medio de elementos en cola de cada uno de los generadores y por tanto no el número de medio de elementos en el sistema. Por tanto, para poder afirmar las conclusiones realizadas en el párrafo anterior, de deben comparar los mismos resultados pero normalizando al número de colas presentes en el sistema. Tal comparativa puede verse en la figura 5.3 donde efectivamente continúa produciéndose una mejora pero no tan substancial. Trabajar con más usuarios implica aumentar la varianza del canal, en el sentido que un sistema que no trabaje en saturación conseguirá mejores prestaciones (número de elementos en cola menor), sin embargo, los umbrales de funcionamiento (varianza mínima), son independientes al número de usuarios, dependiendo tan sólo de la distribución del canal (varianza del canal). De este modo, dado un tráfico ofrecido podemos calcular cuál será la varianza mínima que deberá tener el canal para soportar tal tráfico independientemente del número de usuarios que se vayan a repartir dicho tráfico. Sin embargo, el número medio de elementos en el sistema sí que depende del número de usuarios. Si observamos las mejoras en términos de número de elementos en cola, mostrados en la última figura, no es esperable que se mejore mucho más por el hecho de aumentar indiscriminadamente el número de usuarios presentes en el sistema.

5.5.3 Dependencia con el tráfico ofrecido

En la primera de las secciones de este apartado se ofrecían los resultados de la simulación básica indicando que variarían substancialmente con el tráfico ofrecido. De hecho, cabe esperar que a mayor tráfico ofrecido peores prestaciones en cuanto a número de elementos en cola y tiempo en el sistema, sin embargo veremos a continuación, que el sistema consigue muy buenos resultados a costa de exigir una mayor varianza al canal. Recordemos

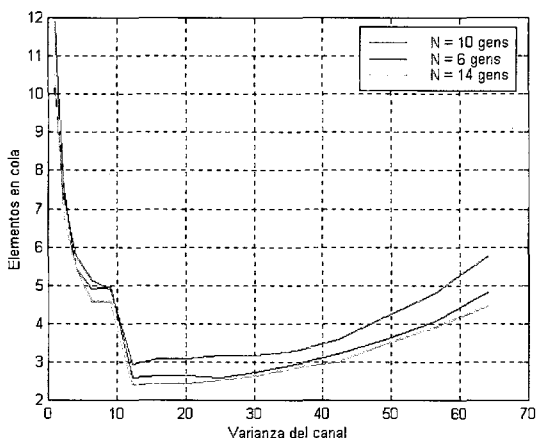


Fig. 5.3 Comparativa del número de elementos en el sistema.

que aunque modifiquemos la varianza del canal, este se encuentra siempre normalizado para que la capacidad media (la que se conseguiría en un asignación clásica secuencial) se siempre la misma.

En la figura 5.4 podemos observar la evolución del número de elementos en cola en función de la carga ofrecida al sistema. Recordemos que el parámetro de sobrecarga (OVER_TRAFFIC) indica la proporción entre el tráfico ofrecido y el tráfico medio del canal.

En la figura anterior podemos comprobar cómo se ha comportado el algoritmo en las diversas simulaciones en las cuales se le ha ido aumentando el tráfico común ofrecido por los 10 usuarios presentes en todas las simulaciones. Este es quizás el gráfico más significativo del algoritmo porque muestra claramente que el sistema satura a una varianza mínima que depende de la carga ofrecida. De modo intuitivo, a mayor tráfico ofrecido, mayor varianza exigida por el algoritmo. La figura también muestra cómo el algoritmo llega a aguantar un 70 % más del tráfico nominal a condición, eso si, que la varianza del canal sea extraordinariamente grande. Es aquí donde el realismo toma lugar indicando que las distribuciones clásicas de los canales no adquieren varianzas tan elevadas. De hecho se ha podido comprobar que un canal exponencial de media 10 paq / u.t. tiene como varianza 5.53, valor realmente pequeño en nuestro gráfico comparativo. Todavía más desfavorable resulta un canal Rayleigh de la misma capacidad porque su varianza supera levemente la unidad.

Sin embargo, la conclusión teórica del algoritmo es que si continuásemos realizando simulaciones, obtendríamos que podemos aumentar indiscriminadamente el tráfico de entrada hasta que el empeoramiento producido por la excesiva varianza (límite por la derecha) chocase con la mínima varianza exigida (límite por la izquierda). Las gráficas indican que cada vez que aumentamos el tráfico ofertado, ambos límites tienden a acercarse más rápidamente, lo cual indica que no debe estar demasiado lejos el límite teórico de carga ofertada.

Por último, las simulaciones apuntan a unas prestaciones comunes independientes de la carga ofrecida cuando el

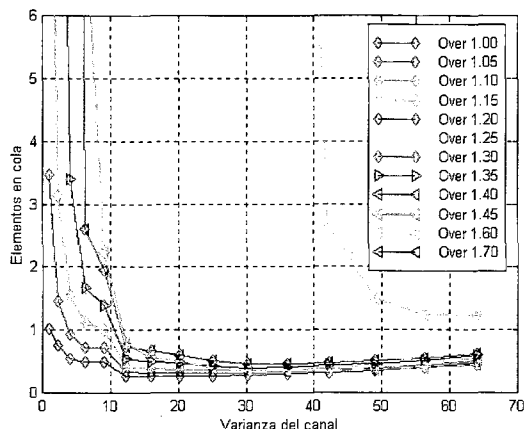


Fig. 5.4 Elementos en cola según la carga ofrecida.

escenario se encuentra lejos de los puntos de saturación. Dicha conclusión se extrae del hecho de que todas las simulaciones de simulación colapsan en una misma línea cuando se alejan del codo producido por la saturación.

5.5.4 Conclusiones finales

Durante los tres últimos apartados se han introducido los aspectos más relevantes dentro de las simulaciones efectuadas en los diferentes escenarios escogidos. Se ha de comprender la limitación de las conclusiones a la realización específica de la distribución de canal, dado que el estudio tan sólo pretende analizar la dependencia de la varianza con las prestaciones del algoritmo, dejando al margen todos los momentos de mayor orden.

En segundo lugar, las conclusiones de mayor orden extraídas son la existencia de una varianza mínima en función de la carga ofertada y una mejora de las prestaciones con el aumento del número de usuarios. No podemos concluir este apartado sin formular la conclusión de la varianza mínima de forma más genérica. En la siguiente tabla se expone la varianza límite aproximada para cada uno de los valores de tráfico considerado y el tanto por ciento de veces que el rate cae por encima del tráfico ofrecido. Dicho de otro modo, partamos de una distribución gaussiana en donde considerar una varianza límite equivale a garantizar que un tanto por ciento de las realizaciones caigan al lado derecho del umbral marcado por tráfico ofrecido.

Si disponemos el tanto por ciento de la población que cae por encima del tráfico ofertado podremos comprobar que tiende a establecerse en un valor límite cercado al 17 por ciento. Por tanto, como regla aproximada, la distribución de canal debe de tener un 17 por ciento de su distribución de probabilidad por encima del tráfico ofertado. En una asignación clásica secuencial con distribución simétrica, la distribución de canal debería tener el 50 por ciento por encima y el cincuenta por debajo. En cambio, ahora el máximo tráfico cursable se sitúa por encima del tráfico nominal de forma que deje a su derecha un 17 por ciento de la distribución. La figura 5.12 muestra de forma gráfica la mejora de las prestaciones de forma general y definitiva.

6. ESTUDIO PRÁCTICO SOBRE CANAL VARIANTE

6.1 Introducción

En la presente sección se mostrarán los resultados de simulación obtenidos en los escenarios de trabajo caracterizados por las distribuciones de tráfico comentadas en

la sección 4 y por las diferentes distribuciones de calidad de canal expuestas en la sección 3. Debido a que el sistema posee un único servidor para atender a los diferentes usuarios (ya que el servidor simula el canal móvil), su parámetro tiempo de servicio será variable en función del usuario que el algoritmo M-LWDF haya escogido para transmitir en un cierto instante. Este tiempo de servicio será calculado como el inverso del rate instantáneo de ese usuario, pues la generación estadística finalmente será llevada a cabo sobre el parámetro rate o velocidad de transmisión.

De esta forma, cada escenario de simulación queda definido por dos parámetros:

- o Distribución de generación de tráfico de entrada
 - Exponencial (Poisson), IPP, On-Off
- o Distribución de calidad de canal (SNR)
 - Exponencial (entorno urbano o *indoor*)
 - Rayleigh (entorno semi-urbano)

El criterio será caracterizar un escenario por el tipo de generación de tráfico de entrada que utiliza, y dentro de ese escenario se simulará para los dos tipos de distribuciones de canal consideradas, observándose así el impacto de la calidad de la transmisión en el sistema. Una vez seleccionado el escenario según el tráfico de entrada, se realizarán simulaciones en función del número de usuarios que acceden al sistema, con valores habituales de 2, 4, 6, 10 y 14 usuarios, permitiéndonos comprobar la evolución del sistema a medida que aumenta su número de usuarios. Por otro lado es importante indicar que fijada la capacidad media del sistema a 10 kbps, la generación de tráfico ha sido configurada para que siempre ofrezca una tasa de tráfico igual a la tasa máxima que puede admitir un sistema monousuario ($M/M/1$). De este modo, denotando como m a la tasa de salida, la generación de tráfico se ha fijado a un valor de $\lambda = \mu$. Obviamente, la simulación de este sistema monousuario mostraría que éste se encuentra en saturación, puesto que su parámetro de utilización es de:

$$r = \lambda / \mu = \mu / \mu = 1$$

A medida que se vaya aumentando el número de usuarios, la política a seguir será la misma, generar para cada usuario una tasa de tráfico de manera que la suma para todos los usuarios se convierta en un tráfico total de tasa $\lambda_{total} = \mu$. A diferencia del caso monousuario que se ha comentado anteriormente, en este nuevo caso a pesar de recibir el servidor la misma tasa de tráfico de entrada, la respuesta del sistema será mejor cuantos más usuarios disponga, pues a mayor número de usuarios, mayor variedad de rates/tiempos de servicio instantáneos con los que

Over	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
Varianza mínima	1	4	6	12	20	30	42	56
Tráfico ofrecido	10	11	12	13	14	15	16	17
Porcentaje población	50	30.85	20.7	19.32	18.55	18	17.27	17.47

Tabla. 5.1 Varianza mínima exigida en función del incremento de tráfico

analizar cuál es el que mejor se ajusta a sus necesidades de maximización de throughput. Ello hará que la tasa media de salida sea superior a su valor teórico, por lo que será posible aumentar ligeramente la tasa de tráfico que le será ofrecida al sistema. Para ello se ha definido un parámetro denominado como "over", el cual será utilizado en las simulaciones para comprobar la sobrecarga de tráfico de entrada que puede soportar el sistema respecto al caso monousuario.

En el caso monousuario el sistema no tendría más remedio que utilizar siempre el valor de rate/tiempo de servicio instantáneo que obtiene el único usuario que hay, obteniendo a veces valores buenos, pero otras veces valores muy malos que irremediamente tendría que aceptar. A medida que aumenta el número de usuarios, es lógico que por muy bajos que sean las realizaciones de los rates aparezca haya al menos alguna realización que sea comparativamente mejor que el resto, y por tanto pueda ser aprovechada para transmitir en ese instante y aumentar así en media, la tasa de salida.

Recordemos por otro lado que la ponderación M-LWDF tiene en cuenta no sólo el rate instantáneo sino también el número de elementos en cola, por lo que un aumento considerable de este número dará prioridad a ese usuario, a pesar que su rate no sea comparativamente el mejor.

Finalmente comentar que los principales parámetros del sistema que serán analizados en cada una de las simulaciones serán el retardo medio en el sistema, el rate medio conseguido por el servidor, y la evolución del número de elementos en cola.

6.2 Escenario con tráfico exponencial

Este escenario se caracteriza por la utilización de una generación de tráfico de entrada de tipo exponencial o Poisson, repartiéndose la tasa de llegada entre los diferentes usuarios de manera que la tasa global que se ofrezca al servidor sea la máxima permitida por el sistema. De esta forma se pretende analizar el comportamiento en saturación del sistema, pues así se obtendrá una idea de las prestaciones máximas que pueden conseguirse en comparación con un sistema normal.

Para cada número de usuarios, el procedimiento consiste en simular diferentes puntos de trabajo, a partir de la tasa global máxima equivalente para un sistema M/M/1. De este modo, como ya se comentó anteriormente, siendo m la tasa de salida de paquetes servidos (el tiempo de servicio es pues de media $1/\mu$), la máxima tasa de entrada será de $\lambda = \mu$, ya que supondremos un caso de colas infinitas para centrar nuestro problema en el algoritmo de asignación de recurso y no en el desbordamiento de las colas (aunque siempre se intentará trabajar en puntos de trabajo en donde en número de elementos en cola permanezca estable).

Partiendo de una tasa global de entrada $\lambda = \mu$, con m igual a la capacidad estadística media del canal, ésta será

repartida de manera equitativa entre los N usuarios. Tras realizar una primera simulación con el Algoritmo M-LWDF, se puede apreciar cómo a pesar de recibir una tasa de paquetes de entrada igual a la que teóricamente en media puede servir, la utilización del servidor disminuye a medida que aumenta el número de usuarios debido a que existe mayor diversidad estadística con la que el Algoritmo M-LWDF puede trabajar.

Ello es lógico si se tiene en cuenta que el Algoritmo M-LWDF aprovecha los mejores instantes del canal para transmitir, haciendo que la tasa real de servicio de paquetes sea superior a la tasa media que teóricamente habíamos calculado. De esta forma, es posible incrementar el tráfico de entrada en un cierto porcentaje, y volver a simular para ver cómo evoluciona la ocupación del servidor. Mientras ésta se encuentre por debajo del valor inestable de 0.99, el sistema será capaz de procesar más tráfico de entrada. Es por este motivo que se ha definido el parámetro *OVER* con el cual sobrecargar el tráfico individual de entrada de cada usuario. Este parámetro nos permitirá analizar la mejora en términos de incremento de tráfico de entrada que el Algoritmo M-LWDF consigue.

Cabe mencionar que el aumento de tráfico de entrada no será directamente proporcional a la disminución producida en la utilización del sistema, ya que éste posee un algoritmo de asignación de canal que puede modelarse como un sistema no lineal, por lo que el efecto del tráfico que finalmente puede introducirse debe observarse mediante simulación.

Este hecho es el que muestran las figuras 6.2a y 6.2b, donde se presenta la evolución del rate medio que ha conseguido el Algoritmo M-LWDF para diferentes sobrecargas de tráfico de entrada y en función de diferentes números de usuarios. Como puede comprobarse, se consigue incrementar el tráfico de entrada total hasta en un 25 % para el caso de distribución de SNR exponencial.

El efecto que el rate medio aumente a medida que aumenta la sobrecarga de tráfico introducido al sistema es lógico,

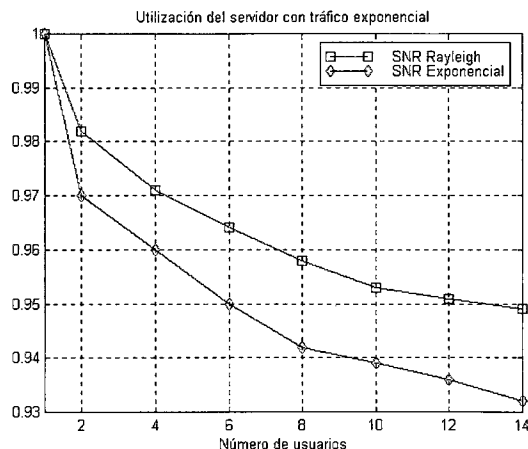


Fig. 6.1. Reducción de la utilización del servidor con $\lambda = \mu$ gracias al algoritmo M-LWDF.

ya que a más tasa de entrada de paquetes mayor debe ser también la tasa de salida para evitar que se saturen las colas del sistema. De hecho, las simulaciones se han llevado a cabo hasta conseguir saturar el sistema, observando la evolución del número de elementos en cola. Como puede verse, cuantos más usuarios existen en el sistema mayor es el punto de trabajo que se consigue antes de llegar a saturación, lo cual es coherente con la gráfica 6.1 que muestra una disminución de la utilización del servidor con el número de usuarios.

Por lo que respecta a las gráficas 6.2a y 6.2b que acaban de presentarse, se aprecia claramente el impacto que produce el tipo de distribución de canal que se utiliza. De esta forma, los mejores resultados tanto en términos de sobrecarga de tráfico de entrada como de rate medio conseguido se obtienen para la distribución exponencial, pues su mayor varianza respecto la distribución de tipo Rayleigh hace que el Algoritmo M-LWDF disponga de mayor variedad de valores estadísticos en donde buscar los mejores instantes de transmisión. En el caso de la distribución de tipo Rayleigh, sin embargo, su menor varianza hace que los rates medios conseguidos posean una dispersión bastante menor, tal y como se observa en la gráfica 6.2b donde los valores conseguidos apenas varían en función del número de usuarios en el sistema.

Este mismo hecho fue ya adelantado en la sección 5, donde se abordó estudio teórico del impacto de la varianza de la distribución del canal sobre la tasa de transmisión conseguida con M-LWDF, el cual cobra ahora sentido.

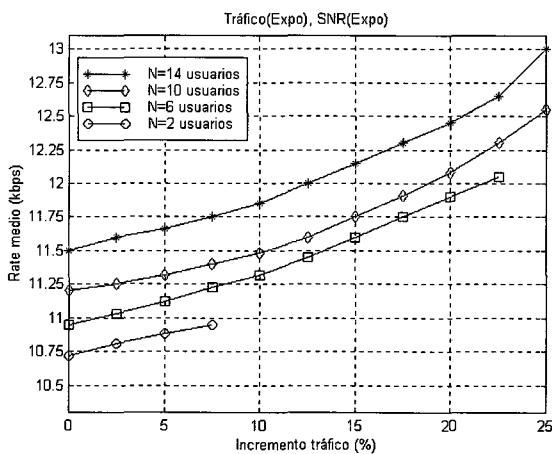


Fig. 6.2a. Rate medio conseguido por el servidor en función de la sobrecarga de tráfico de entrada para SNR exponencial.

Otro aspecto interesante a evaluar es la evolución del tiempo medio de espera en el sistema a que han de hacer frente los paquetes de entrada. Este parámetro es de gran importancia al permitir definir un criterio de QoS fijando un umbral máximo permitido sobre el retardo en el sistema a partir del análisis de los resultados obtenidos. En las figuras 6.3a y 6.3b se presenta la evolución de este retardo para las dos distribuciones de SNR bajo estudio.

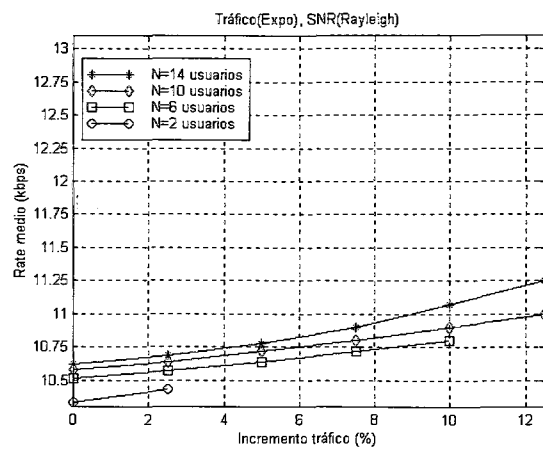


Fig. 6.2b. Rate medio conseguido por el servidor en función de la sobrecarga de tráfico de entrada para SNR Rayleigh.

A partir de la observación de las gráficas de retardo medio puede concluirse que no todos los valores de rates medio presentados en las gráficas 6.2a y 6.2b son posibles si se busca mantener un criterio de QoS basado en garantizar un cierto retardo máximo en sistema. En efecto, para valores pequeños de incremento de tráfico puede conseguirse una zona de trabajo con retardo en sistema aproximadamente constante para diferente número de usuarios, pero que aumentando en exceso la sobrecarga de tráfico (a medida que el sistema se acerca a su estado de saturación o de inestabilidad), el retardo comienza a crecer de manera exponencial.

Al igual que ocurría con la evolución de los rates medios, el escenario con distribución de SNR de tipo Rayleigh presenta las peores prestaciones, ya que consigue llegar a un estado de inestabilidad en cuanto a retardo medio en sistema, en un margen menor de sobrecarga de tráfico de entrada que en el caso exponencial. Así por ejemplo, para el caso de N=14 usuarios, el escenario Rayleigh comienza a ser inestable a partir de una sobrecarga del 7.5 % mientras que en el escenario Exponencial esto no ocurre hasta aproximadamente el 22 %.

6.3 Escenario con tráfico IPP

Como comparativa respecto al escenario con generación de tráfico exponencial, se ha simulado un nuevo escenario de trabajo basado en generación de paquetes IPP la cual, tal y como se ha visto en la sección 4, se caracteriza por ser un tráfico a ráfagas con generación exponencial durante el periodo de actividad.

Siguiendo el mismo enfoque que se ha dado para el análisis del Algoritmo M-LWDF para tráfico exponencial, en este nuevo caso el tráfico total de entrada también parte del caso límite para $M / M / 1$, esto es $l_{total} = m$. Para ello la generación de ráfagas se ha configurado de manera que la tasa media de generación total de paquetes sea la misma que en el caso del escenario contemplado en el apartado

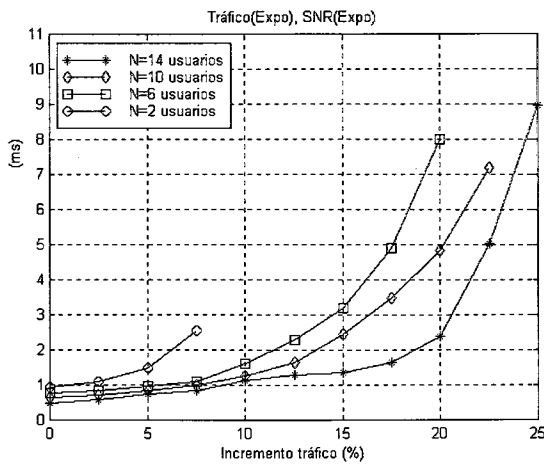


Fig. 6.3a. Retardo medio en sistema en función de la sobrecarga de tráfico de entrada para SNR exponencial.

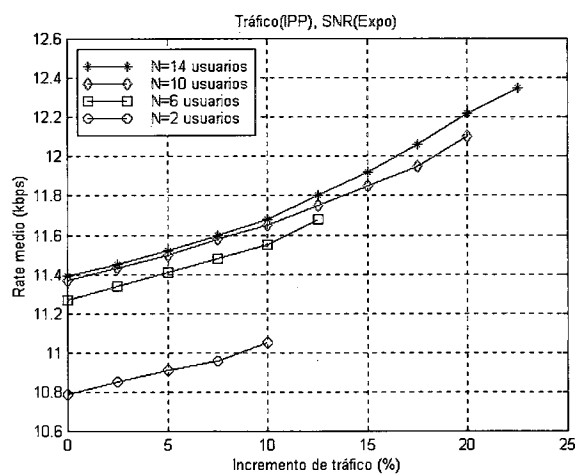


Fig. 6.4a. Rate medio conseguido por el servidor en función de la sobrecarga de tráfico de entrada para SNR exponencial.

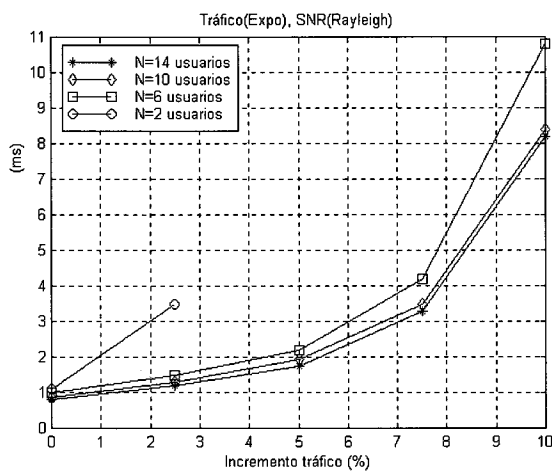


Fig. 6.3b. Retardo medio en sistema en función de la sobrecarga de tráfico de entrada para SNR Rayleigh.

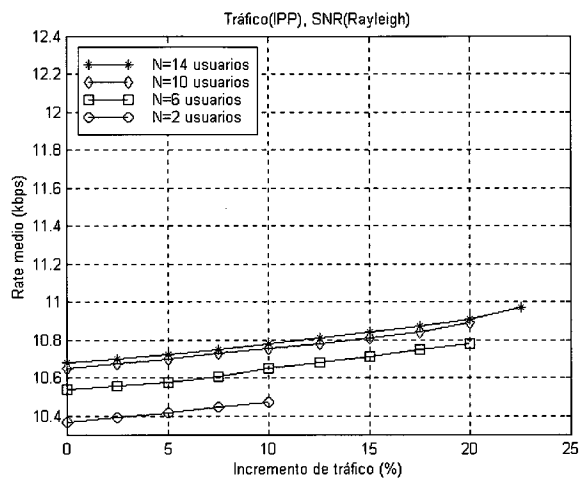


Fig. 6.4b. Rate medio conseguido por el servidor en función de la sobrecarga de tráfico de entrada para SNR Rayleigh.

6.2, siendo la tasa individual de llegada durante el periodo de actividad igual a $5l_i$. De este modo se pretende evaluar el impacto que supone el cambiar de una naturaleza de tráfico exponencial, a una de tipo a ráfagas, siendo el tráfico ofrecido medio el mismo en ambos casos.

En las figuras 6.4a y 6.4b se muestran los resultados obtenidos para el rate medio de salida en función del incremento de tráfico a la entrada, para las habituales distribuciones de SNR de tipo exponencial y Rayleigh.

La primera observación que puede hacerse es que, al igual que en el escenario de tráfico exponencial, las prestaciones del algoritmo son peores cuanto menor es la varianza de la distribución de SNR que se posee. Esto se aprecia en la figura 6.4b, donde los rates medios conseguidos por el servidor experimentan una leve mejora respecto la media estadística del canal de 10 kbps, y además la evolución para un número mayor de usuarios tampoco ofrece mejoras importantes.

Respecto la figura 6.4a para distribución de SNR exponencial, la mejora en rate medio es apreciable en función del incremento de tráfico ofrecido, pero un fenó-

meno curioso es que los resultados no siguen aumentando a medida que aumenta el número de usuarios sino que a partir de $N=6$, el incremento de usuarios no mejora sustancialmente el rate medio conseguido, a diferencia de lo que ocurría en el escenario de tráfico exponencial.

Como se indicó en el apartado 6.3, el incremento en número de usuarios es beneficioso para el Algoritmo M-LWDF en términos de mejorar la diversidad estadística de rates instantáneos entre los que elegir el mejor. Entonces la mejora era clara, pues de los dos parámetros que pondera el algoritmo de decisión, esto es, el número de elementos en cola N_i y el rate instantáneo $r_i(t)$ (ver apartado 2.3), el número de elementos en cola se mantiene más o menos constante para el conjunto de usuarios considerados, siendo el rate instantáneo prácticamente el que fija la decisión final. Recordemos que para la realización de este estudio práctico se ha tomado como criterio el análisis del sistema a partir de usuarios con igual tasa de llegada de paquetes, aunque un escenario de simulación mucho más general podría considerar usuarios con tasas de llegadas independientes.

En el caso generar tráfico a ráfagas, a pesar que la tasa media de llegadas para cada uno de los usuarios es la misma, los instantes en los que se producen los periodos de actividad son independientes, por lo que el número de elementos en cola de cada usuario sufrirá grandes variaciones de manera independiente entre los diferentes usuarios. De este modo, el cálculo M-LWDF posee ahora dos variables de gran variabilidad: el rate instantáneo y el número medio de elementos en cola, proveniente éste último como consecuencia de la llegada de paquetes durante el periodo de actividad a una tasa de $5l_i$.

Como resultado, las prestaciones del algoritmo presentan un efecto de saturación a partir de $N=6$ usuarios, pues ahora cuantos más usuarios posea, mayor será también la posibilidad que dos usuarios puedan recibir una ráfaga de paquetes en instantes cercanos. Cada vez que se produce una ráfaga, el número de paquetes en cola crece de manera desmesurada por lo que el algoritmo, en los instantes siguientes, debe prestar la mayor parte de su tiempo a la atención de la ráfaga de ese usuario para disminuir su gran número de elementos en cola, a pesar que su rate instantáneo de transmisión no sea el mejor del sistema.

Ello provoca que, si mientras el servidor intenta atender al usuario que ha recibido una ráfaga, otro recibe una nueva ráfaga, la prioridad del sistema se convierte en la reducción del número de elementos en cola, dejando a un lado la maximización del rate de salida. Es por este motivo por lo que especialmente en la gráfica 6.4a no se observan mejoras importantes en el rate medio de transmisión conforme se aumenta el número de usuarios. El impacto sobre el retardo medio en el sistema se muestra en las gráficas 6.5a y 6.5b.

En tráfico a ráfagas, el efecto de saturación con el número de usuarios puede ahora apreciarse también en las gráficas de retardo medio en sistema. Mientras en la gráfica 6.5a de retardo medio en sistema para distribución de SNR exponencial, a medida que aumenta el número de usuarios disminuye el tiempo en sistema, lo cual es coherente con el hecho que a medida que se aumenta el número de usuarios, esa misma distribución de canal consigue mejorar el rate medio de salida.

Sin embargo, para el caso de la distribución Rayleigh, el hecho que el rate medio apenas mejore a medida que se aumenta el número de usuarios perjudica las prestaciones del sistema. En efecto, a medida que se aumenta el número de usuarios en un escenario con ráfagas mayores son los requerimientos en términos de rate de salida, pues en caso que se coincidan en el tiempo la llegada de varias ráfagas a diferentes usuarios, se necesitará unos buenos rates de transmisión para dar salida a las respectivas acumulaciones de paquetes. Como esto no es posible en una distribución de SNR de tipo Rayleigh, el sistema sufre más para dar salida a los paquetes acumulados cuantos más usuarios posee. Ello se aprecia en la gráfica 6.5b, donde el retardo en sistema disminuye progresivamente para $N=2$,

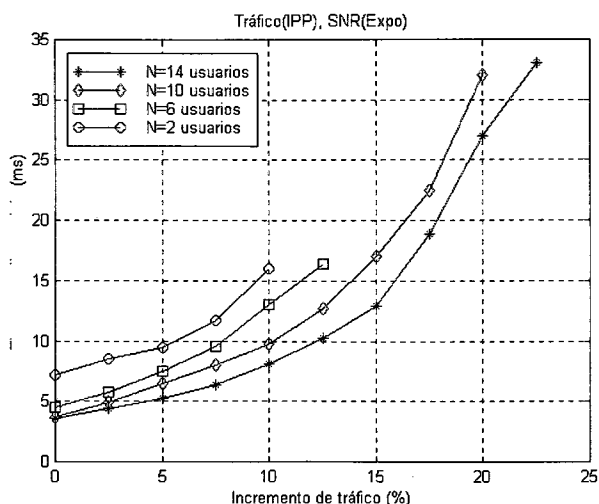


Fig. 6.5a. Retardo medio en sistema en función de la sobrecarga de tráfico de entrada para SNR Exponencial.

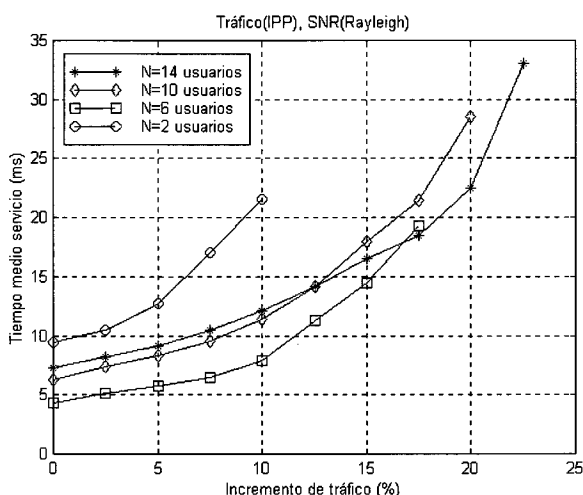


Fig. 6.5b. Retardo medio en sistema en función de la sobrecarga de tráfico de entrada para SNR Rayleigh.

6 usuarios, pero para $N=10$ y 14 usuarios el retardo medio aumenta al no ser capaz el sistema de conseguir rates proporcionalmente buenos respecto el número de usuarios como para seguir la disminución del retardo experimentada para $N=2$ y 6 usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Andrews et al., "Providing Quality of Service over a Shared Wireless Link", IEEE Communications magazine, February 2001.
- [2] Ana Pérez Neira y Gregori Vázquez, "Sincronització i mòdems d'alta velocitat", Apuntes de la asignatura optativa de SMAV (ETSETB-UPC), CPET 2000.
- [3] Grup de Comunicacions Ràdio, Dpt. TSC - UPC, "Transparències de Comunicacions Mòbils", Apuntes de la asignatura de Radiocomunicaciones (ETSETB-UPC), CPET 2000.
- [4] Josep Paradells, "Comunicaciones Móviles de 3ª Generación", Apuntes de la asignatura optativa de CM3G (ETSETB-UPC), CPET 2001.