

# Evaluación de la Influencia de los Algoritmos de “Scheduling” en el Compromiso entre Eficiencia Espectral y Equidad en Redes OFDMA

Emanuel Bezerra Rodrigues y Fernando Casadevall  
{emanuel,ferranc}@tsc.upc.edu  
Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions (TSC)  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)  
Campus Nord, Jordi Girona 1-3, 08034, Barcelona, España.

**Abstract**—System spectral efficiency and user fairness are crucial aspects for resource allocation in multi-user OFDM-based cellular networks. This work intends to investigate the influence of the performance of packet scheduling algorithms on the trade-off between these two objectives in scenarios with non real-time and real-time services. By means of system-level simulations, we were able to create a didactic map of the relation between these two aspects and propose ways to exploit this trade-off efficiently.

## I. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de comunicaciones móviles celulares un cierto número de terminales móviles (MTs) compiten por/comparten el canal de radio. En este contexto, y desde el punto de vista de la asignación de los recursos radio la eficiencia espectral y la equidad de servicio entre los diferentes terminales son aspectos clave a considerar. Desde el punto de vista del Operador Móvil, es muy importante utilizar de forma eficiente los escasos recursos radio con objeto optimizar el uso de la red. Desde el punto de vista del usuario, es más relevante tener garantizada la equidad entre usuarios en el reparto de los recursos disponibles de modo que se pueda garantizar para todos ellos sus requisitos de Calidad de Servicio (QoS) y aumentar su satisfacción.

La naturaleza variante con el tiempo del canal radio, junto con el hecho que los distintos terminales móviles, que están ubicados en posiciones distintas, observen diferentes condiciones instantáneas del canal radio imponen que, en general, estos dos requisitos (eficiencia espectral y equidad) no puedan ser alcanzados simultáneamente. Es por ello que en los últimos años, técnicas inteligentes de Gestión de Recursos Radio (RRM) se han convertido en una de las metodologías más eficientes para alcanzar el deseable compromiso entre estos dos requisitos complementarios.

Por otra parte, la mayoría de los sistemas de comunicaciones móviles de nueva generación están basados en la técnica de acceso OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), que permite un alto grado de flexibilidad que puede ser convenientemente explotado por los algoritmos de RRM. En este tipo de acceso múltiple es posible ubicar dinámicamente subconjuntos de subportadoras a MTs diferentes, así como utilizar técnicas de modulación codificación y niveles de potencia diferentes para cada subportadora en función de las condiciones instantáneas del canal radio percibido por el MT.

En la literatura se han publicado algunos trabajos que tratan de alcanzar el deseable compromiso entre eficiencia espectral y equidad en redes OFDMA, considerando para

ello técnicas de optimización cross-layer [1], [2], teoría de utilidad [3] ó ambas [4]. Sin embargo sólo las referencias [1] y [3] han evaluado de manera explícita la equidad percibida por los usuarios, mientras que los otros trabajos consideran una evaluación implícita comparando diferentes métricas de calidad de servicio. La ventaja de la metodología definida en [1] con respecto a las otras es que define un intuitivo y simple procedimiento de medida de la equidad percibida por el usuario a partir de la definición del denominado índice de equidad. Este artículo extiende el trabajo realizado en [1], mostrando de manera explícita la influencia de los algoritmos de gestión de colas (*Packet Scheduling*) en el compromiso entre eficiencia espectral y equidad en redes celulares basadas en OFDMA considerando escenarios de servicios en tiempo real (RT) y servicios diferidos (NRT).

El artículo se organiza de la siguiente forma: En la sección II se presenta el modelado del sistema estudiado. En la sección III describimos los algoritmos de Scheduling evaluados en esta contribución, mientras que en la sección IV mostramos los resultados de las simulaciones realizadas. Finalmente en la sección V exponemos las conclusiones alcanzadas.

## II. MODELO DE SISTEMA

Al objeto de subrayar los aspectos que intervienen en el compromiso entre eficiencia espectral y equidad, proponemos un escenario muy simple consistente en una única celda exagonal en donde consideramos que existen un único transmisor (Estación Base (BS)) y  $J$  receptores (MTs). El entorno radio considerado es “Typical Urban” (TU) caracterizado por desvanecimientos Rayleigh selectivos en frecuencia, si bien durante el tiempo de coherencia del canal cada subportadora sólo experimenta desvanecimientos planos. Cada usuario experimenta unas condiciones de propagación independientes. Se supone que la velocidad de cambio asociada a los desvanecimientos es suficientemente lenta para que la respuesta en frecuencia del canal no varíe en un intervalo TTI (*Transmission Time Interval*). Además de los desvanecimientos Rayleigh, cada usuario también está afectado por desvanecimientos lentos (*Shadowing Fading*) caracterizados por una distribución log-normal. También se supone que en el transmisor dispone de un perfecto conocimiento del canal (*Channel State Information*-CSI) sin que ello implique una penalización (overhead) en la señal transmitida.

El nivel de la señal recibida depende de las pérdidas de propagación calculadas como:  $L = 128.1 + 37.6 \log_{10} d$ , donde

$d$  es la distancia en Km. Se supone que el MT permanece estacionario, y por lo tanto no se consideran handovers.

Con respecto a la estrategia de asignación de potencia para cada subportadora, se supone que la potencia global de la BS se distribuye por igual entre todas ellas. El número de bits transmitidos en cada subportadora en cada ranura temporal (*time slot*) viene determinado por el modelo de capacidad de Shannon, [4], indicado en la ecuación 1:

$$c_{j,k} = \log_2(1 + \Gamma p_k \rho_{j,k}) \quad (1)$$

donde  $c_{j,k}$  es el caudal alcanzable por el usuario  $j$  en la subportadora  $k$ ,  $p_k$  es la potencia transmitida en la subportadora  $k$ ,  $\rho_{j,k}$  es la relación señal a ruido del usuario  $j$  en la subportadora  $k$  y  $\Gamma$  es un salto de discretización en el valor de SNR dado por  $\frac{1.5}{-\ln 5BER}$  [4] (la tasa de error (BER) considerada es  $10^{-6}$ ). En el estudio se consideran las siguientes modulaciones: QPSK; 16-QAM y 64-QAM.

Con respecto a los modelos de tráfico, se considera que todos los usuarios NRT tienen siempre paquetes para transmitir durante toda la simulación (modelo de buffer lleno). Por lo que respecta a los usuarios RT se considera el servicio Voz sobre IP (VoIP) caracterizado por un modelo ON-OFF en donde la duración de los periodos ON y OFF sigue una estadística exponencial. Durante el periodo ON se genera varios paquetes de tamaño fijo e igual a 32 bytes por muestra de voz. Se ha considerado el codificador de voz AMR (*Adaptive Multirate*) definido por el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) para los sistemas de 3G, de modo que se genera una muestra de voz cada 20 ms. Los paquetes que llegan al extremo receptor con un retardo superior a 100 ms son descartados.

### III. ALGORITMOS DE SCHEDULING

En esta sección se presentan los diferentes algoritmos de scheduling evaluados. En la sección III-A se presentan los considerados para servicios NRT mientras que en la sección III-B los considerados para servicios RT.

#### A. Servicios NRT

Con objeto de estudiar el compromiso entre optimización de la capacidad del sistema y equidad entre usuarios con servicios NRT, se han evaluado los siguientes algoritmos de scheduling: *Max-Rate* (MR), *Max-Min Fairness* (MMF) y *Proportional Fairness* (PF), cuya formulación matemática se presenta en la ecuación 2. Más específicamente, el terminal  $j^*$  es seleccionado para transmitir en la subportadora  $k$  durante el TTI  $n$  si maximiza las siguientes funciones prioridad:

$$P_{j,k}^{MR} = r_{j,k}[n]; P_{j,k}^{MMF} = \frac{1}{T_j[n-1]}; P_{j,k}^{PF} = \frac{r_{j,k}[n]}{T_j[n-1]} \quad (2)$$

donde  $r_{j,k}[n]$  es la máxima velocidad de transmisión alcanzable por el MT  $j$  en la subportadora  $k$  durante el TTI  $n$ , y  $T_j[n-1]$  es el caudal medio del MT  $j$  calculado hasta el TTI  $n-1$ . El caudal medio es promediado utilizando un filtro de alisado de tipo exponencial tal como se indica abajo.

$$T_j[n] = (1 - \lambda) \cdot T_j[n-1] + \lambda \cdot r_j \quad (3)$$

donde  $r_j$  es la velocidad de transmisión instantánea alcanzable por el MT  $j$  y  $\lambda$  es la constante de ponderación del filtrado.

En el algoritmo MR, [5], a cada subportadora se le asigna el MT con mayor calidad de canal con objeto de alcanzar la máxima velocidad de transmisión. Con esta política de

asignación de MTs se alcanza la máxima capacidad de la celda a expensas de una pobre equidad (en términos de caudal) entre MTs, ya que no selecciona aquellos MTs con peores condiciones de propagación (fuertes desvanecimientos).

El algoritmo MMF asigna mayor prioridad al MT con peor caudal medio, [6]. De esta forma se garantiza la equidad entre MTs en términos de caudal ya que a largo plazo todos los MTs observan el mismo caudal. Esta equidad se alcanza a expensas de la eficiencia espectral en tanto en cuanto muy a menudo se seleccionan MTs con pobres condiciones instantáneas de propagación (canales con fuertes desvanecimientos) y, como en la expresión del  $P_{j,k}^{MMF}$  en ecuación 2 no hay dependencia con la velocidad alcanzable ( $r_{j,k}[n]$ ), todas las subportadoras se asignan al mismo usuario ya que este tiene siempre paquetes para transmitir (condición *full-buffer*).

Finalmente con el algoritmo de scheduling PF, [7], se toma en consideración simultáneamente la condición instantánea del canal en cada subportadora y el caudal medio percibido por cada MT (condición de equidad). Con ello se alcanza un compromiso entre eficiencia espectral y equidad basada en el caudal, y representa una estrategia intermedia entre MR y MMF.

#### B. Servicios RT

En el caso de servicio RT se han evaluado los siguientes algoritmos de scheduling: *Proportional Fairness* (PF), *Delay-Based First Input First Output* (D-FIFO) y *Modified Largest Weighed Delay First* (M-LWDF), cuya formulación matemática se presenta en la ecuación 4. El terminal  $j^*$  es seleccionado para transmitir en la subportadora  $k$  durante el TTI  $n$  si maximiza las siguientes funciones prioridad:

$$P_{j,k}^{PF} = \frac{r_{j,k}[n]}{T_j[n-1]}; P_{j,k}^{D-FIFO} = D_j^{hol}[n]; \quad (4)$$

$$P_{j,k}^{M-LWDF} = \frac{r_{j,k}[n]}{T_j[n-1]} \cdot D_j^{hol}[n]$$

donde  $D_j^{hol}[n]$  es el retardo experimentado por el primer paquete de la cola (*Head Of Line-HOL*) del usuario  $j$  en el TTI  $n$  y  $T_j[n-1]$  es el caudal medio del terminal  $j$  calculado hasta el TTI  $n-1$  tal como se indica en la ecuación 3.

De los algoritmos presentados en esta subsección cabe esperar que el algoritmo PF sea el de peor equidad en términos de retardo y el más eficiente en el uso de los recursos, ya que su métrica no está directamente influenciada por el retardo y toma en consideración la calidad instantánea del canal. De hecho se ha elegido evaluar PF y no MR ya que se espera que PF presente mejores prestaciones en el caso de servicios sensibles al retardo.

D-FIFO da prioridad a aquellos usuarios con mayor valor de retardo del primer paquete de la cola (HOL). Obviamente es el algoritmo que proporciona mejor equidad a largo plazo en términos de retardo. Obviamente, y tal como ocurría con el algoritmo MMF para servicios NRT, esta equidad se alcanza a expensas de la eficiencia espectral en tanto en cuanto, al no considerar el estado del canal (CSI), muy a menudo se seleccionan terminales con pobres condiciones instantáneas de propagación, con lo que disminuye el caudal global del sistema y la eficiencia espectral.

Obviamente con M-LWDF, [9], se alcanza un compromiso entre eficiencia espectral y equidad basada en el retardo, y representa una estrategia intermedia entre PF y D-FIFO.

#### IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Nuestra definición de equidad está basada en QoS. Por este motivo los índices de equidad para los servicios NRT y RT están basados en el caudal de la sesión y retardo, respectivamente, tal como se indica en la ecuación 5.

$$\phi_j^{NRT}[n] = \frac{T_j[n-1]}{T_j^{req}}; \quad \phi_j^{RT}[n] = \frac{D_j[n]}{D_{req}} \quad (5)$$

donde  $T_j^{req}$  es el caudal garantizado del MT NRT  $j$  y  $D_{req}$  es el retardo máximo permitido para el servicio RT.  $D_j[n]$  es calculado a través de un filtrado exponencial:

$$D_j[n] = (1 - \tau) \cdot D_j[n-1] + \tau \cdot \overline{D_j^{inst}}[n] \quad (6)$$

donde  $\overline{D_j^{inst}}$  es el retardo medio instantáneo de los paquetes presentes en la cola del usuario  $j$  en TTI  $n$ .

Los índices de equidad  $\phi_j^{NRT}[n]$  y  $\phi_j^{RT}[n]$  se calculan en cada TTI y para cada usuario dependiendo del tipo de servicio. El índice de equidad general del sistema se define como:

$$\Phi^{NRT}[n] = \frac{\left(\sum_{j=1}^J \phi_j^{NRT}[n]\right)^2}{J \cdot \sum_{j=1}^J \left(\phi_j^{NRT}[n]\right)^2} \quad (7)$$

$$\Phi^{RT}[n] = \frac{\left(\sum_{j=1}^J \frac{1}{\phi_j^{RT}[n]}\right)^2}{J \cdot \sum_{j=1}^J \left(\frac{1}{\phi_j^{RT}[n]}\right)^2} \quad (8)$$

donde  $J$  es el número de MTs en la celda, y  $\phi_j^{NRT}[n]$  y  $\phi_j^{RT}[n]$  se calculan en ecuación 5. Obsérvese que  $\frac{1}{J} \leq \Phi \leq 1$ . Una asignación perfectamente equitativa es alcanzada cuando  $\Phi = 1$ , lo que significa que el caudal o el retardo experimentado por los MTs son igualmente proporcionales a sus requisitos de caudal/retardo (todos los índices de equidad de los MTs son iguales). La peor asignación ocurre cuando  $\Phi = \frac{1}{J}$ , lo que significa que todas las subportadoras se asignaron a un único MT.

Los parámetros utilizados en la simulación están indicados en tabla I. En las secciones IV-A y IV-B mostramos los resultados para los servicios NRT y RT, respectivamente. Con objeto de evaluar la eficiencia en el uso de los recursos, utilizamos la métrica del caudal total de la celda. La métrica de equidad basada en QoS es el índice medio de equidad del sistema: los valores de los índices  $\Phi^{NRT}[n]$  and  $\Phi^{RT}[n]$  se calcularon utilizando las ecuaciones 7 y 8, se filtraron con un filtrado exponencial y se mediaron en toda la simulación.

##### A. Servicios NRT

El índice medio de equidad del sistema basado en caudal se muestra en la Fig. 1(a). Como se esperaba, MMF es el algoritmo más equitativo, mientras MR es el menos equitativo. PF presenta un comportamiento intermedio, confirmando ser un compromiso entre los anteriores. El comportamiento del PF es más cercano del MMF que del MR, con un índice de equidad próximo de 0.9.

La figura 1(b) presenta el caudal total de la celda, lo que es una medida de la eficiencia espectral del sistema. MR es el algoritmo con las mejores prestaciones, mientras que MMF no es capaz de explotar eficientemente los recursos disponibles. Nuevamente, PF presenta una prestación intermedia. Analizando Figs. 1(a) y 1(b), uno puede ver claramente los

TABLE I  
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

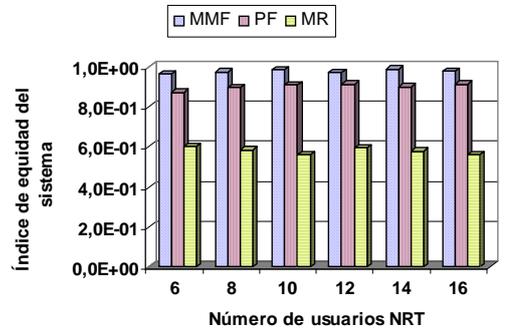
Parámetro	Valor	Unidad
Número de celdas	1	-
Potencia de transmisión de la EB	5	W
Radio de la celda ( $R$ )	500	m
Número de subportadoras ( $K$ )	192	-
Ancho de banda de la subportadora ( $\Delta f$ )	15	KHz
Duración del TTI	0.5	ms
Desviación padrón del shadowing	8	dB
Potencia del ruido por subportadora	-123.24	dBm
Esquemas de modulación	QPSK, 16-QAM, 64-QAM <sup>a</sup>	-
Requerimiento del caudal ( $T_j^{req}$ )	1.4	Mbps
Requerimiento del retardo ( $D_{req}$ )	100	ms
Constantes del filtro del caudal ( $\lambda$ ), retardo ( $\tau$ ) y factor de equidad	0.1	-
Tiempo de simulación	15	s
Número de realizaciones para cada punto	10	-

<sup>a</sup> Solamente QPSK y 16-QAM fueron utilizados para las simulaciones RT.

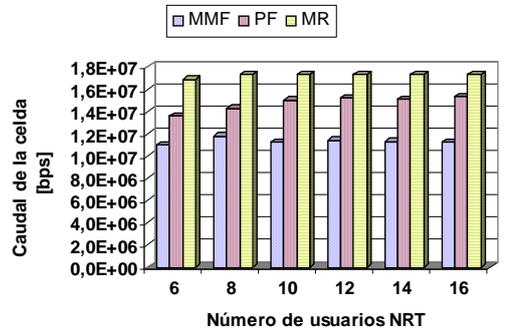
objetivos contrapuestos entre maximización de la capacidad y equidad, y como MR y MMF son capaces de alcanzar uno de éstos objetivos en detrimento del otro. PF es una excepción porque logra encontrar un compromiso entre ambos objetivos.

##### B. Servicios RT

El índice medio de equidad del sistema basado en retardo se muestra en Fig. 2(a). D-FIFO es el algoritmo que presenta la equidad mayor porque da prioridad estricta a los usuarios con retardo de cola más grande. Por otro lado, en tanto que PF no toma en consideración el retardo, presenta el menor índice de equidad, que decrece a medida que el número de usuarios aumenta. M-LWDF toma en consideración en su política de



(a) Equidad basada en caudal



(b) Caudal de la celda

Fig. 1. Análisis del compromiso para servicios NRT.

scheduling ambos la calidad del canal y el retardo, lo que provoca un comportamiento variante de la equidad en el rango de valores de cargas considerados. Como era de esperar, los valores del índice de equidad del M-LWDF están dentro del rango de valores del D-FIFO y PF.

En la Fig. 2(b) se muestra el caudal total de la celda para los diferentes algoritmos de scheduling considerados en función del número de usuarios. Como era de esperar, las mejores y peores prestaciones se obtienen con los algoritmos PF y D-FIFO, respectivamente. Esto se explica por el hecho que el primero da mayor importancia a la calidad del canal, lo que resulta en una mejor eficiencia en el uso de los recursos, mientras que el segundo solamente toma en consideración la información del retardo, lo que puede ocasionar una asignación ineficiente de los recursos radio disponibles. Un resultado sorprendente es el obtenido con la estrategia M-LWDF, ya que su prestación fue tan buena como la obtenida por el algoritmo PF, proporcionando un gran caudal en la celda. Analizando las figuras 2(a) y 2(b), se puede concluir que M-LWDF puede lograr un buen compromiso entre eficiencia de los recursos y equidad entre los usuarios en un escenario con usuarios RT.

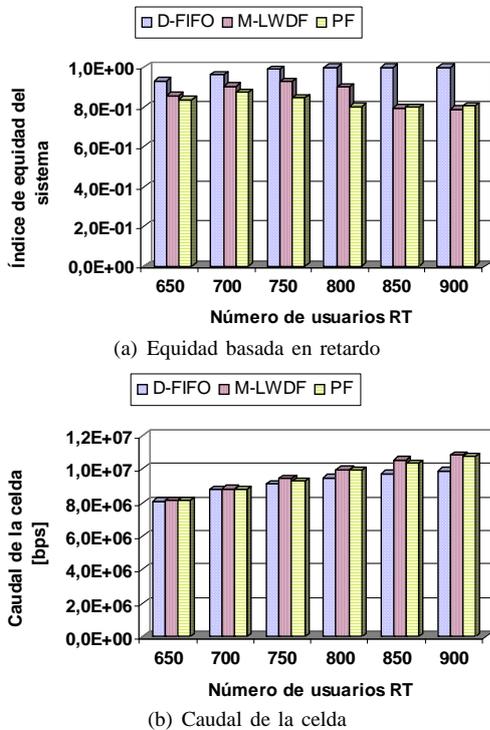


Fig. 2. Análisis del compromiso para servicios RT.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos evaluado algoritmos de scheduling apropiados para servicios NRT y RT para sistemas basados en OFDMA, y hemos evaluado su influencia en el compromiso entre un uso eficiente de los recursos radio disponibles y la equidad entre los usuarios. Analizando los resultados obtenidos por simulación, podemos diseñar un mapa didáctico, resumido en la tabla II, de las relaciones entre los dos objetivos contrapuestos y mencionados anteriormente.

Del estudio, podemos concluir que existen algoritmos de scheduling que son capaces de encontrar este punto de compromiso, como por ejemplo los algoritmos PF y M-LWDF para los casos de servicios NRT y RT, respectivamente. Sin embargo, estos algoritmos solamente son capaces de dar una visión estática del problema, por lo que sería muy interesante proponer algoritmos de scheduling capaces de adaptarse dinámicamente y de forma controlada tanto a las variaciones propias de los escenarios de comunicaciones móviles (pe. al número de usuarios, ubicación de los mismos, etc.) como a los objetivos a medio y largo plazo cambiantes de los operadores móviles. Este dinamismo está siendo actualmente objeto de nuestra investigación.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el contexto de la Red de Excelencia en Comunicaciones Inalámbricas NEWCOM++ financiada por la Unión Europea (contrato n<sup>o</sup>. 216715). Emanuel B. Rodrigues disfruta de una beca de Doctorado financiada por el programa de Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Nivel Superior (CAPES) - Brasil.

## REFERENCES

- [1] Rodrigues, E.B., Casadevall, F.: Adaptive Radio Resource Allocation Framework for Multi-User OFDM. In: IEEE 69th Vehicular Technology Conference - VTC Spring, Barcelona, Spain (2009)
- [2] Hou, H., Zhou, W., Zhou, S., Zhu, J.: Cross-Layer Resource Allocation for Heterogeneous Traffics in Multiuser OFDM Based on a New QoS Fairness Criterion. In: IEEE 66th Vehicular Technology Conference - VTC Fall, pp. 1593–1597 (2007)
- [3] Lei, H., Zhang, L., Zhang, X., Yang, D.: A Packet Scheduling Algorithm Using Utility Function for Mixed Services in the Downlink of OFDMA Systems. In: IEEE 66th Vehicular Technology Conference - VTC Fall, pp. 1664–1668 (2007)
- [4] Song, G., Li, Y.G.: Cross-Layer Optimization for OFDM Wireless Networks - Part I: Theoretical Framework and Part II: Algorithm Development. IEEE Trans. on Wireless Comm., vol. 4, no. 2, pp. 614–634 (2005)
- [5] Jang, J., Lee, K.B.: Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 21, no. 2, pp. 171–178 (2003)
- [6] Ameigeiras, P.J.G.: Packet Scheduling and Quality of Service in HSDPA, Ph.D. dissertation, Aalborg University, Aalborg, Denmark (2003)
- [7] Kelly, F.: Charging and Rate Control for Elastic Traffic. European Transactions on Communications, vol. 8, pp. 33–37 (1997)
- [8] Andrews, M., Kumaran, K., Ramanan, K., Stolyar, A., Whiting, P., Vijayakumar, R.: Providing Quality of Service over a Shared Wireless Link. IEEE Comm. Magazine, vol. 39, no. 2, pp. 150–154 (2001)

TABLE II

RELACIONES ENTRE SCHEDULING, EFICIENCIA ESPECTRAL Y EQUIDAD.

	Servicios NRT	Servicios RT
MMF	Baja eficiencia espectral y alta equidad basada en caudal	-
PF	Compromiso entre eficiencia y equidad para servicios NRT	-
MR	Alta eficiencia espectral y baja equidad basada en caudal	-
D-FIFO	-	Baja eficiencia espectral y alta equidad basada en retardo
M-LWDF	-	Compromiso entre eficiencia y equidad para servicios RT
PF	-	Alta eficiencia espectral y baja equidad basada en retardo