



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

Evaluación de Mecanismos de Asignación de Base en Redes WCDMA con Limitación de Capacidad en la Red de Transporte

Autor: Anna Lainz Fernandez

Director: Hiram Galeana Zapién

Director ponente: Ramon Ferrús Ferré

Departamento: Teoría de la señal y comunicaciones

Octubre 2010

Resumen

El despliegue de los sistemas de tercera generación (3G) ha incrementado tanto el número de suscriptores móviles como el de redes operativas alrededor del mundo. Esta creciente demanda de servicios de tráfico de datos impone nuevos requerimientos en el ancho de banda en la red de transporte que interconecta las estaciones base y los controladores radio en la red de acceso radio. A esta infraestructura de transporte se le denominada *backhaul*. En la actualidad, los operadores de telefonía móvil se encuentran en la búsqueda de soluciones con buena relación coste-beneficio que posibiliten maximizar la eficiencia del uso de recursos existentes en el *backhaul*, ya que su implantación, gestión y mantenimiento contribuyen de forma significativa al coste total de operación y mantenimiento de las redes de acceso móviles.

En este trabajo se plantea una estrategia de asignación de base capaz de balancear el tráfico generado en una red celular WCDMA, con el objetivo de prevenir situaciones de congestión presentes en redes con limitación de capacidad en el *backhaul*. En particular, la estrategia propuesta *Backhaul-aware* incorpora el estado de la capacidad, tanto de la interfaz radio como de la red de transporte, en el proceso de asignación de usuarios a estaciones base.

Se ha modelado un sistema que permite analizar el problema de asignación de base y simular las distintas estrategias. De este modo se ha evaluado y comparado el rendimiento de la estrategia *Backhaul-aware* en distintos entornos. Inicialmente se han considerado escenarios simplificados en los que todos los usuarios solicitan un servicio con la misma tasa de transmisión y la red tiene una capacidad de transporte homogénea en todas las estaciones base. Una vez se ha constatado la mejora que aporta la estrategia propuesta, se ha añadido complejidad al sistema simulando entornos multiservicios, con una capacidad de transporte no homogénea en las estaciones base y con la posibilidad de priorizar una de las tasas de transmisión.

Los resultados de simulación obtenidos revelan que la estrategia de asignación de base propuesta mejora de manera sustancial a las estrategias de asignación que se basan exclusivamente en criterios radio, en términos del grado de satisfacción de los usuarios y del porcentaje de soluciones de asignación factibles.

Índice

1	Introducción	1
2	Motivación	4
2.1	Requerimientos de Capacidad en la Red de Acceso Móvil	4
2.1.1	Red de transporte	5
2.2	Gestión de Recursos de Red	6
2.2.1	Gestión de recursos radio	7
2.2.2	Gestión de recursos en la red de transporte	8
2.3	Resumen	10
3	Problema de Asignación de Base en Redes Móviles	11
3.1	Revisión de la literatura	11
3.2	Estrategias de Asignación de Base	13
3.2.1	Estrategia basada en la Menor Pérdida de Propagación	13
3.2.2	Estrategia basada en Consumo de Potencia	13
3.2.3	Estrategia Propuesta: Backhaul-aware	13
3.3	Modelado del sistema	13
3.4	Modelado de la interfaz radio	14
3.4.1	Potencia de usuario en el enlace descendente	14
3.4.2	Potencia de usuario en el enlace ascendente	15
3.4.3	Modelo de propagación	15
3.5	Modelado de la red de transporte	16
3.5.1	Cálculo de la Capacidad Radio	16
3.5.2	Metodología de Dimensionado	17
3.6	Formulación del problema	18
3.7	Análisis de complejidad del problema	18
4	Algoritmos Propuestos	20
4.1	Algoritmo basado en Simulated-Annealing	20
4.1.1	Antecedentes de Simulated Annealing	20
4.1.2	Funciones de Utilidad	21
4.1.3	Funcionamiento del Algoritmo de SA	22
4.1.4	Complejidad Computacional	25
4.2	Algoritmo de Asignación Basado en Costes	26
4.2.1	Planteamiento de Problema de Optimización	27
4.2.2	Mapeo del Problema a un MMKP	28
4.2.3	Funcionamiento del Algoritmo	30
4.2.4	Complejidad Computacional	36
4.3	Resumen	37
5	Modelos y Herramientas de Simulación	39
5.1	Plataforma de Simulación	39
5.1.1	Entorno celular	39
5.1.2	Enlace radio	39

5.2	Parámetros de Simulación	41
5.3	Metodología de Evaluación.....	42
5.4	Definición de Métricas de Evaluación.....	42
6	Rendimiento de las Estrategias de Asignación de Base.....	43
6.1	Definición de escenarios de evaluación	43
6.2	Método de resolución.....	43
6.2.1	Selección del algoritmo de resolución	44
6.2.2	Fiabilidad de los resultados	44
6.3	Escenarios Monoservicio	46
6.3.1	Capacidad de transporte homogénea	46
6.3.2	Capacidad de transporte no homogénea	54
6.4	Escenarios Multiservicio.....	60
6.4.1	Servicios sin priorización	61
6.4.2	Servicios con priorización	64
6.4.3	Resumen.....	72
7	Conclusiones.....	73
8	Bibliografía	75
9	Acrónimos.....	77

Índice de figuras

Figura 1.	Arquitectura de red del sistema UMTS.....	2
Figura 2.	Incremento de las tasas de transmisión en las comunicaciones móviles.....	4
Figura 3.	Arquitectura backhaul en sistemas móviles.....	5
Figura 4.	Multiplexado y Demultiplexado inverso de celdas ATM vía grupos IMA.....	6
Figura 5.	Entidades involucradas en la gestión de recursos radio.....	8
Figura 6.	Modelado del sistema considerando recursos radio y transporte.....	14
Figura 7.	Representación gráfica del MMKP.....	29
Figura 8.	Diagrama de flujo del algoritmo de asignación de base basado en costes.....	35
Figura 9.	Escenario celular compuesto por 19 celdas hexagonales.....	39
Figura 10.	Diagrama de flujo de la obtención de resultados.....	44
Figura 11.	% Satisfacción de Usuarios para $R_b=384$ Kbps con $\Phi=1$ y 1.5.....	47
Figura 12.	% Satisfacción de Usuarios para $R_b=128$ Kbps con $\Phi=1$ y 1.5.....	47
Figura 13.	% Satisfacción de Usuarios para $R_b=384$ Kbps con $\Phi=2$ y 2.5.....	48
Figura 14.	% Satisfacción de Usuarios para $R_b=128$ Kbps con $\Phi=2$ y 2.5.....	48
Figura 15.	Número de usuarios para % Satisfacción del 95% vs. Φ , $R_b=384$ Kbps.....	49
Figura 16.	Número de usuarios para % Satisfacción del 95% vs. Φ , $R_b=128$ Kbps.....	50
Figura 17.	Potencia media EB vs. Número de usuarios, $R_b=384$ Kbps, $\Phi=1.5$	51
Figura 18.	Potencia media EB vs. Número de usuarios, $R_b=128$ Kbps, $\Phi=1.5$	52
Figura 19.	Potencia media TM vs. Número de usuarios, $R_b=384$ Kbps, $\Phi=1.5$	53
Figura 20.	% Potencia media MT vs. Número de usuarios, $R_b=128$ Kbps, $\Phi=1.5$	54
Figura 21.	Número de usuarios vs. porcentaje de EB limitadas, $\Phi_{limited}=1$, $R_b=384$ Kbps.....	55
Figura 22.	Número de usuarios vs. porcentaje de EB limitadas, $\Phi_{limited}=1.5$, $R_b=384$ Kbps.....	56
Figura 23.	Número de usuarios vs. porcentaje de EB limitadas, $\Phi_{limited}=1$, $R_b=128$ Kbps.....	57
Figura 24.	Número de usuarios vs. porcentaje de EB limitadas, $\Phi_{limited}=1.5$, $R_b=128$ Kbps.....	57
Figura 25.	Incremento porcentual de usuarios BA vs RB vs. % EB limitadas y $\Phi_{limited}$, $R_b=384$ Kbps...	59
Figura 26.	Incremento porcentual de usuarios BA vs RB vs. % EB limitadas y $\Phi_{limited}$, $R_b=128$ Kbps...	59
Figura 27.	Número de usuarios vs. % EB limitadas, $\Phi_{limited}=1$	61
Figura 28.	Número de usuarios vs. % EB limitadas, $\Phi_{limited}=1.5$	62
Figura 29.	Incremento porcentual de usuarios de BA respecto RB vs. % EB limitadas y de $\Phi_{limited}$	63
Figura 30.	Número de usuarios vs. % Usuarios con $R_b=384$ Kbps, $\Phi_{limited}=1$, 32% EB limitadas.....	64
Figura 31.	% Revenue vs. relación de profits K, $\Phi_{limited}=1$	66
Figura 32.	Mejora del revenue BA respecto RB, vs. relación de profits K, $\Phi_{limited}=1$	67
Figura 33.	% Satisfacción para RB vs. relación de profits K, $\Phi_{limited}=1$	68
Figura 34.	% Satisfacción para BA según R_b vs. la relación entre profits K, $\Phi_{limited}=1$	68
Figura 35.	Número de usuarios totales para 95% vs relación de profits K, $\Phi_{limited}=1$	69

Figura 36. Número de usuarios satisfechos para RB según R_b vs. relación entre profits K, $\Phi_{limited}=1$. 70

Figura 37. Número de usuarios satisfechos para BA según R_b vs. la relación entre profits K, $\Phi_{limited}=170$

Figura 38. Incremento porcentual en número de usuarios satisfechos vs relación de profits K, $\Phi_{limited}=1$

71

Índice de tablas

Tabla 1.	Parámetros para el cálculo de la capacidad radio.....	17
Tabla 2.	Capacidad de transporte en función de Φ	17
Tabla 3.	Pseudo código del algoritmo SA.....	23
Tabla 4.	Cálculo complejidad computacional del algoritmo SA.....	26
Tabla 5.	Cálculo complejidad computacional del algoritmo basado en costes	37
Tabla 7.	Pseudo-código para el cálculo de potencia	40
Tabla 8.	Parámetros de simulación	41
Tabla 9.	Porcentaje de usuarios satisfechos para $R_b=384$ Kbps	45
Tabla 10.	Porcentaje de usuarios satisfechos para $R_b=128$ Kbps	46
Tabla 11.	Consumo medio de potencia en la EB, $R_b=384$ Kbps, $\Phi=1.5$	51
Tabla 12.	Consumo medio de potencia en la EB, $R_b=128$ Kbps, $\Phi=1.5$	52
Tabla 13.	Consumo medio de potencia MT para cada estrategia, $R_b=384$ Kbps, $\Phi=1.5$	53
Tabla 14.	Consumo medio de potencia TM, $R_b=128$ Kbps, $\Phi=1.5$	54
Tabla 15.	Incremento porcentual de usuarios de BA y RB respecto MPL vs. $\Phi_{limited}$, $R_b=384$ Kbps.....	58
Tabla 16.	Incremento porcentual de usuarios de BA y RB respecto MPL vs. $\Phi_{limited}$, $R_b=128$ Kbps....	58
Tabla 17.	Incremento porcentual de usuarios respecto MPL vs. $\Phi_{limited}$ para RB y BA.....	63
Tabla 18.	Beneficio en usuarios de BA respecto RB vs. % Usuarios con $R_b=384$ Kbps	64
Tabla 19.	% Satisfacción de usuario en función de K y R_b	69
Tabla 20.	Número de usuarios satisfechos en función K y R_b	71

1 Introducción

Durante los últimos años el auge mundial de las comunicaciones móviles celulares ha sido verdaderamente sorprendente, de forma que el despliegue de los sistemas de tercera generación (3G) ha incrementado tanto el número de suscriptores móviles como el de redes operativas alrededor del mundo. Uno de los principales estándares 3G es el sistema europeo UMTS (*Universal Mobile Communication System*) [5], que representa una evolución de los sistemas de segunda generación (2G) GSM/GPRS (*Global System for Mobile Communication / GSM Packet Radio System*), en términos de capacidad, velocidad de transmisión y nuevos servicios. El desarrollo de las especificaciones del sistema UMTS se lleva a cabo dentro del foro 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), el cual, a finales de 1999, generó el primer conjunto de especificaciones (denominado *release 99* o R99). En esa versión inicial, las principales novedades introducidas respecto las redes GSM/GPRS se enfocan en la definición de la red de acceso radio UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y una nueva interfaz radio (WCDMA, *Wideband Code Division Multiplexing Access*), con dos modos de operación, FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*). Otro aspecto distintivo es la utilización de la tecnología ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) en la capa de transporte (TNL, *Transport Network Layer*), que es responsable de la interconexión de los nodos de la red de acceso.

En los sistemas 3G existe la posibilidad de proporcionar una amplia gama de servicios CS (*Circuit Switched*) y PS (*Packet Switched*), y cada uno de ellos requiere una determinada Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*). Para garantizar los niveles de QoS de cada conexión es necesaria la implementación de estrategias y algoritmos que permitan gestionar el uso de los recursos en la red de acceso. A este tipo de mecanismos se les conoce como estrategias de gestión de recursos radio (RRM, *Radio Resource Management*). El desarrollo de nuevas estrategias RRM se hace aún más patente debido a que los estándares de los sistemas celulares no normalizan las soluciones RRM, por lo que cada operador puede desarrollar e implementar las estrategias RRM que considere oportunas.

Por otra parte, la creciente demanda de servicios de tráfico de datos impone nuevas exigencias de ancho de banda en la red de transporte o *backhaul*. Se denomina *backhaul* a la infraestructura que interconecta las estaciones base (EB), o Nodos B en la terminología 3GPP, con los controladores radio de la red (RNC, *Radio Network Controller*) dentro de la red de acceso radio (RAN, por sus siglas en inglés). Las líneas de transmisión usados habitualmente en el *backhaul* son enlaces E1/T1 punto a punto, que interconectan los elementos de red a través del uso de diversos tipos de topologías, utilizando radioenlaces, cable o fibra óptica. Dichos medios de transmisión pueden ser propiedad del operador o ser alquilados a proveedores de acceso de última milla. La Figura 1 muestra los componentes de la arquitectura de red del sistema UMTS.

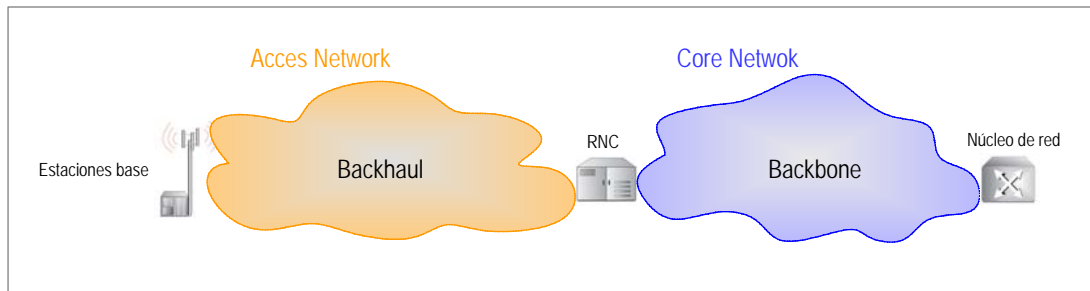


Figura 1. Arquitectura de red del sistema UMTS

Cabe destacar que el despliegue, gestión y mantenimiento del *backhaul* contribuyen de forma muy significativa al coste total de los operadores móviles [32]. Diversas fuentes señalan que entorno al 20-25% de los costes totales en una red celular corresponden a la infraestructura de transporte en la red de acceso [31] [35]. Por este motivo, es de vital importancia que las estrategias actuales de expansión de la capacidad de transporte de la red de los operadores móviles tengan una relación coste-beneficio adecuada. En este sentido, existen diferente tipo de propuestas tecnológicas que los operadores pueden utilizar para maximizar la eficiencia del uso de recursos en el *backhaul*.

En este sentido, las diferentes soluciones tecnológicas disponibles en el mercado están siendo propuestas para mejorar la eficiencia del *backhaul*, como por ejemplo Ethernet sobre fibra, así como soluciones híbridas en las que el tráfico de voz o en tiempo real se desvía hacia la red de transporte actual, y el tráfico de datos HSPA (*High Speed Packet Access*) se desvía hacia una red IP (*Internet Protocol*). Por otro lado, también es necesaria la optimización del ancho de banda de las redes existentes, desplegando topologías de red que permitan una mayor agregación del tráfico y realizando una gestión más eficiente de los recursos de red disponibles.

En este contexto, el trabajo realizado en el presente proyecto de fin de carrera se centra en el estudio del problema de asignación de base en redes basadas en WCDMA. El problema de asignación de base es un factor clave en los sistemas celulares WCDMA para poder mantener la calidad necesaria para el servicio ofrecido. Hasta ahora se ha asumido que la red de transporte dispone de recursos de red suficientes para soportar el tráfico generado en las estaciones base, y por ello el problema de asignación de base comúnmente se evalúa considerando únicamente el rendimiento de la interfaz radio. No obstante, debido a que los mecanismos basados en criterios de asignación radio no consideran la disponibilidad de los recursos de transporte de las EB, es probable que puedan incurrir en asignaciones "no factibles" desde el punto de vista de la red de transporte de una EB, provocando una degradación de la QoS de los usuarios.

En este sentido, cada vez resulta más evidente que a medida que los sistemas de comunicaciones móviles incorporan tecnologías de acceso radio espectralmente más eficientes, el cuello de botella en la red de acceso puede aparecer en la red de transporte. En este trabajo se propone una estrategia en la que se considera tanto la carga radio de la estación base como la capacidad de transporte disponible, a fin de prevenir situaciones de congestión en la red de transporte debido a limitaciones de capacidad de transporte en las estaciones de base en el sistema.

El resto del presente documento se distribuye de la siguiente manera. En el segundo capítulo se presenta la motivación para realizar este estudio. Se detalla la red de acceso móvil y sus requerimientos de

capacidad, así como los mecanismos utilizados actualmente para gestionar los recursos de los dispone la red. El tercer capítulo se centra en el problema de la asignación de base, resumiendo las líneas de investigación existentes y analizando brevemente las diferentes soluciones que han sido propuestas para resolver el problema en cuestión. Además, también se presenta el modelado del sistema desarrollado a fin de evaluar el problema de la asignación de base teniendo en cuenta aspectos radio y de transporte, así como su formulación matemática. Se discute también la complejidad que presenta la resolución del problema de asignación de base planteado.

En el cuarto capítulo se plantean dos algoritmos heurísticos para solucionar el problema de asignación de base en redes WCDMA en condiciones de limitación de capacidad en la red de transporte. En primer término se ha utilizado el algoritmo desarrollado en el trabajo [2] para resolver el problema de asignación de base. Dicho algoritmo se basa en la técnica de Simulated Annealing, que permite encontrar una asignación factible mediante la maximización de la utilidad global del sistema. Para cada una de las estrategias de asignación de base se define una función de utilidad que modela y refleja el nivel de cumplimiento de cada criterio de asignación. En segundo término, se ha utilizado el algoritmo basado en costes planteado en los artículos [1] y [4]. El algoritmo presentado se plantea como un problema de optimización basado en el concepto de costes de recursos, por lo que para obtener una solución de asignación de base incorpora el consumo de recursos radio y transporte. El problema de optimización se transforma en un problema de optimización combinatoria denominado MMKP (*Multidimensional Multiple-choice Knapsack Problem*) y se aborda su resolución mediante un algoritmo heurístico basado en multiplicadores de Lagrange. De ambos algoritmos de solución, Simulated Annealing y basado en costes, se proporciona un análisis de complejidad computacional.

Mediante el modelado y simulación de un sistema de comunicaciones móviles WCDMA y usando el algoritmo de solución basado en costes se ha evaluado la estrategia de asignación de base que incorpora tanto el estado de la red de transporte como la interfaz radio en la toma de decisiones. En el capítulo 5 se detallan los elementos del sistema tenidos en cuenta en este proyecto de fin de carrera, así como los valores utilizados de estos parámetros en las simulaciones realizadas. También se describe la metodología usada para la evaluación y sus métricas.

Posteriormente, en el capítulo 6 se muestra el rendimiento obtenido por la estrategia propuesta y por las estrategias de asignación de referencia basadas únicamente en factores radio, considerando distintos escenarios en cuanto a la tasa binaria del servicio ofrecido y la capacidad de transporte en las EB. Este análisis nos ha confirmado que la estrategia propuesta *Backhaul-aware* permite incrementar el número de usuarios en el sistema, o lo que es lo mismo, mejorar el grado de satisfacción de usuarios para unas determinadas condiciones en la red. Finalmente, en las conclusiones se resumen los aspectos más relevantes del estudio realizado y los resultados obtenidos.

2 Motivación

Este capítulo tiene por objeto analizar el impacto de la creciente demanda de servicios de datos que pueden proveer mayores tasas de transmisión sobre la red de acceso, y a partir de ello se argumentará la necesidad de desarrollar soluciones para la gestión de recursos que incorporen el estado de la red de transporte celular.

2.1 Requerimientos de Capacidad en la Red de Acceso Móvil

La red de acceso radio en el sistema UMTS denominada UTRAN proporciona la conexión entre los terminales móviles y el Núcleo de Red (CN, *Core Network*). Se compone de una serie de sistemas de red radio (RNS, *Radio Network System*), que están formados por un controlador radio (RNC) y un conjunto de estaciones base, referidas en la terminología del 3GPP como Nodos B. En la red de acceso radio existen diversas interfaces encargadas de la comunicación tanto con el Núcleo de Red (Iu) como entre los elementos de UTRAN (Iur e Iub), así como entre UTRAN y los terminales (interfaz radio).

En el contexto de redes UMTS, la demanda de servicios de datos de alta velocidad es cada vez más generalizada, a la vez que los sistemas celulares incorporan tecnologías de acceso radio más robustas. Ello se traduce en un volumen de tráfico mayor a soportar en las celdas y por tanto la red de transporte debe ser configurada para soportar todo el tráfico que la interfaz radio acepta. En la Figura 2 se presenta un esquema de la evolución de las velocidades ofrecidas por los distintos sistemas y su correspondiente tecnología en el *backhaul*.

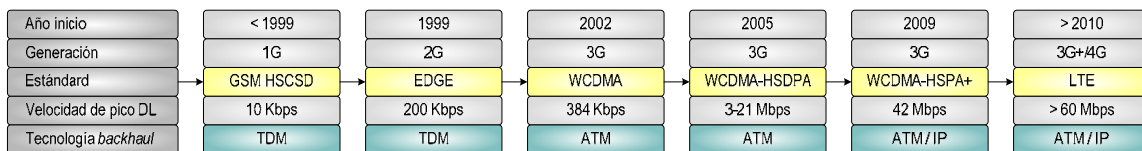


Figura 2. Incremento de las tasas de transmisión en las comunicaciones móviles

El elevado crecimiento de usuarios junto con los servicios de banda ancha ha provocado un incremento exponencial en la capacidad de transporte requerida para el *backhaul*. El coste del despliegue, mantenimiento y/o alquiler de la red de transporte hacia las RNC obliga a que el *backhaul* se diseñe acorde a la capacidad radio planificada en la implantación de la estación base. Comúnmente, en las redes dominadas por el tráfico de voz, dicho dimensionado se realizaba en base a la tasa de transmisión máxima soportada por la interfaz radio. Esto era factible debido a las tasas relativamente bajas ofrecidas en la interfaz radio. Sin embargo, a medida que se han implantado tecnologías de acceso radio más eficientes, el dimensionado de acuerdo a la tasa de pico en la interfaz radio no resulta una solución con una buena relación coste-eficiencia. Es decir, las mejoras en el interfaz radio junto con la demanda de servicios con mayores tasa de transmisión ha provocado que, en determinados escenarios suceda que el cuello de botella de las redes móviles pase a ser el *backhaul*, adquiriendo cada vez mayor relevancia y resultando ser un factor clave en el despliegue de las redes de comunicaciones móviles.

2.1.1 Red de transporte

Se denomina *backhaul* a la infraestructura en la red de acceso radio que interconecta las estaciones base con los RNC. La Figura 3 muestra la arquitectura del *backhaul* en los sistemas de comunicaciones móviles, y en la que se pueden diferenciar dos tramos a nivel de tecnología, topología y forma de transmisión utilizada:

- última milla (*last mile*), entre las EB y los concentradores o agregadores de tráfico.
- media milla (mid mile) desde los agregadores de tráfico hasta los RNC.

La topología de la red de transporte entre las EB y los RNC puede ser en cadena, anillo, estrella o mixtas, y la configuración utilizada dependerá de la capacidad necesaria para cada uno de los nodos. Cabe destacar que las estaciones base pueden actuar como concentrador de tráfico de otras, como por ejemplo en el caso de una topología de estrella. Las infraestructuras de interconexión utilizadas en el *backhaul* pueden ser propias de cada operador o arrendadas a otros operadores. Por otra parte la selección del medio de transmisión a usar en el *backhaul* depende de las necesidades del operador y su coste: pares de cobre, fibra óptica, radioenlaces de microondas, satélite, etc.

Ahora bien, mediante la conexión por pares o fibra óptica, ya sea en propiedad o en alquiler, el despliegue de la red de transporte representa un coste elevado e implica dificultades económicas, contractuales y legales en el paso del cableado hasta las estaciones base. La opción de interconexión con radioenlaces resulta más económica pero requiere visibilidad entre la estación base y un concentrador de tráfico. Esta tecnología es dominante en aquellos operadores que no disponen de ninguna infraestructura existente debido a su menor coste de implantación y mantenimiento.

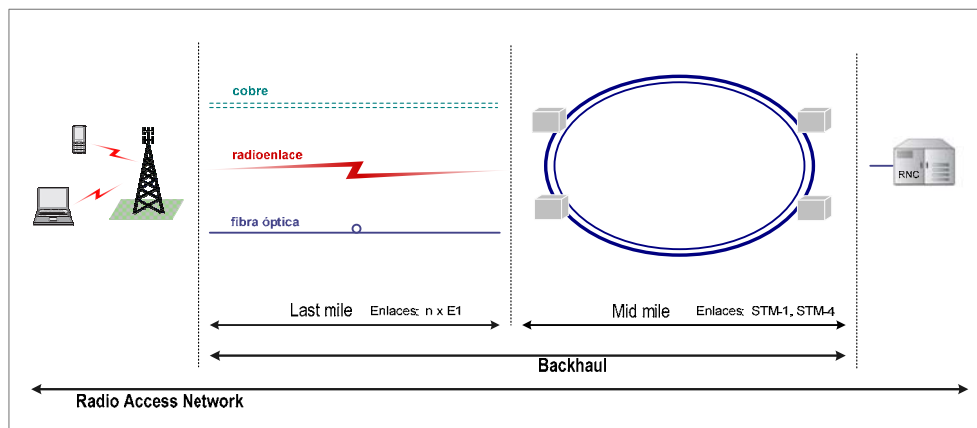


Figura 3. Arquitectura backhaul en sistemas móviles

Actualmente la interconexión entre las EB y los RNC se realiza con un esquema de transmisión típicamente con el protocolo PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) en la última milla con enlaces E1, E3 y en la media milla, SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) con enlaces STM-1, STM-4.

De acuerdo a los estándares de 3GPP la interfaz lub (entre Nodo B y RNC) puede ser transportada sobre IP o protocolos ATM. En la actualidad la tecnología mayoritariamente implementada por los fabricantes está basada en ATM, y su adopción se debe a que permite proporcionar una QoS configurable y

coherente. Sin embargo, el crecimiento en el tráfico está forzando a los operadores a buscar soluciones alternativas para el *backhaul* que sean escalables, económicas y no comprometan la QoS.

Si se usa un interfaz PDH, a medida que en una estación base requiere de mayor capacidad, se incrementa el número de enlaces E1 (2048 Kbps). En ese caso existe la opción de usar la funcionalidad de transmisión IMA (*Inverse Multiplexing over ATM*) [9], que permite aprovechar mejor el enlace y evita la fragmentación. Tal como se ilustra en la Figura 4, la funcionalidad IMA permite unir varios enlaces a nivel físico como si fueran uno solo desde el punto de vista de tráfico de ATM, cuya capacidad suma aproximadamente de cada uno de ellos. Su uso es habitual para reducir los costes de *backhaul*.

Por ejemplo, mientras un enlace E1 de 2048 Kbps tiene una tasa binaria disponible para celdas ATM de 1920 Kbps (4500 celdas ATM), cuando se introduce IMA la tasa disminuye a 1867 Kbps (4376 celdas). Se produce una pequeña reducción de la capacidad debida a la señalización que añade la funcionalidad IMA. Esto afecta a la capacidad total de transmisión si sólo hubiera servicios de voz, sin embargo siempre es mayor la mejora al no fragmentar los servicios de mayor velocidad o mezcla de servicios.

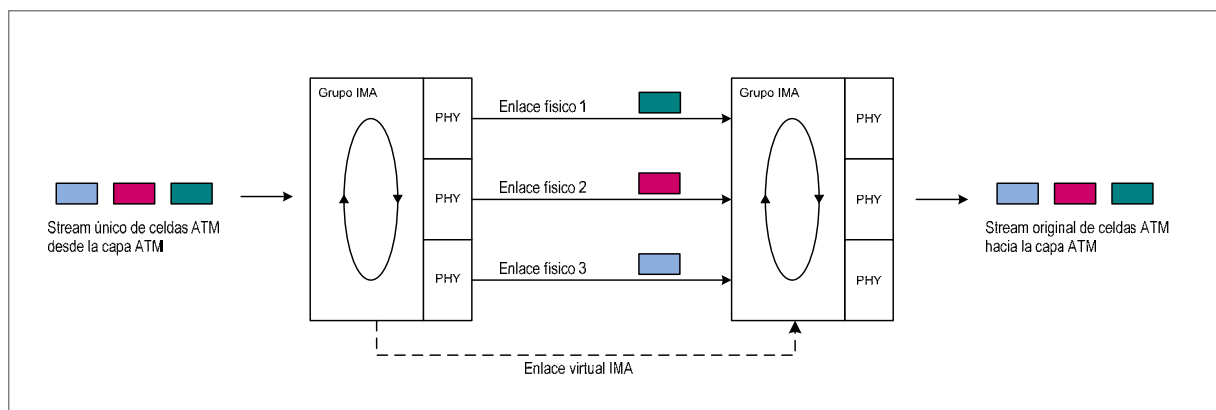


Figura 4. Multiplexado y Demultiplexado inverso de celdas ATM vía grupos IMA

Si se requieren interfaces ATM de mayor capacidad puede usarse ATM sobre SDH con interfaces STM-1 (155 Mbps) no canalizados, especialmente cuando va aumentando el grado de concentración de tráfico de la red, para la media milla y para la conexión del interfaz lu con el núcleo de la red.

El desafío del *backhaul* en la telefonía móvil abre un resquicio para poder incorporar nuevas soluciones a la red de transporte como tecnologías basadas en paquetes, así como una optimización de los recursos disponibles en la red de transporte.

2.2 Gestión de Recursos de Red

En vista de lo anterior, en los sistemas de comunicaciones móviles es posible que existan limitaciones de capacidad tanto en la interfaz radio como en la red de transporte. En este apartado se describen de manera breve los diferentes mecanismos para gestionar los recursos de la red.

En los sistemas de 2G como GSM la capacidad viene determinada por el número de frecuencias portadoras, cada una con un número fijo de canales, por lo que la capacidad máxima radio del sistema es fija. Por su parte, la capacidad de transporte necesaria para las estaciones base se determina a partir del

valor máximo de la capacidad radio. En contraposición se encuentran los sistemas de 3G basados en WCDMA, que integran servicios de distinta naturaleza y distintos parámetros de QoS, y su capacidad está relacionada directamente con la cantidad de interferencia en el sistema. Dado que no existe un valor constante para la máxima capacidad de la red, la capacidad de transporte de las estaciones base se dimensionan con un ancho de banda que viene determinado por una previsión del tráfico radio estimado en el enlace descendente, que a su vez depende de distintos factores como la velocidad binaria del servicio solicitado por los usuarios, la interferencia o el número de usuarios en el sistema.

Es por este motivo que en este contexto cobran especial relevancia la gestión de los recursos en redes 3G, ya sea a nivel de la interfaz radio (RRM, *Radio Resource Management*) como de la red de transporte.

2.2.1 Gestión de recursos radio

El objetivo de la gestión de los recursos radio es asegurar la cobertura y la capacidad planificada para cada servicio, proporcionar la calidad del enlace requerida y optimizar el uso de la capacidad disponible. RRM aporta los algoritmos y protocolos necesarios para el control de los recursos compartidos y la potencia interferente en la red. Este tipo de mecanismos y estrategias son responsables de establecer, supervisar y liberar enlaces radio entre el móvil y la red para proporcionar un nivel elevado de calidad de servicio y diferenciado entre las clases de QoS. RRM es un factor esencial en la optimización del funcionamiento de las redes ya que, mediante el uso de algoritmos de gestión de recursos eficientes, se puede explotar mejor la capacidad de la infraestructura de la red. Además muchas de las dificultades de gestión de recursos se encuentran fuera del alcance de la estandarización, creando un área libre de competición entre los fabricantes.

Para garantizar una calidad de servicio hay dos niveles de control implicados. Por un lado es necesario un control de la congestión mediante protocolos de acceso múltiple y procedimientos de asignación de recursos a nivel de paquete (*scheduling*) que regulen los instantes de transmisión y la cantidad de servicio proporcionada a los distintos usuarios. También se requiere control de la carga y de la potencia para garantizar la calidad de servicio en términos de probabilidad de pérdida de paquetes (BLER), asegurando la E_b/I_0 requerida, el retardo medio y máximo y el *jitter* de retardo.

Por otro lado se requiere un control de admisión que asegure que el número de usuarios admitidos en el sistema sea tal que pueda asegurarse la calidad de servicio a nivel de llamada y de paquete. Además de garantizar calidad de servicio debe proporcionar máxima eficiencia evitando el rechazo innecesario de llamadas. A nivel de llamada, la calidad se expresa en términos de probabilidad de bloqueo de nuevas llamadas y probabilidad de terminación de llamadas en curso.

Las estrategias de RRM se pueden clasificar en las realizadas a nivel de conexión y a nivel de red. A continuación se detalla brevemente la funcionalidad de cada una de ellas.

- Control de potencia (PC, *Power Control*): mantiene la calidad del enlace radio ajustando las potencias de ambos sentidos del enlace. Se intenta conseguir los requerimientos de calidad con la mínima potencia a fin de generar poca interferencia sobre la red radio.
- Control de admisión (AC, *Admission Control*): se encarga de decidir si una petición de establecimiento de conexión, con ciertos parámetros de QoS, puede ser aceptada o no. La decisión puede basarse en la interferencia que generaría esta nueva conexión en el sistema si

fuese aceptada, para poder garantizar la QoS de las conexiones previamente establecidas. Permite mantener la estabilidad mientras intenta conseguir una elevada capacidad tráfico en la red de acceso radio.

- Selección del formato de transmisión (PS, *Packet Scheduling*): planifica los recursos radio para las conexiones que proporcionan servicios en modo paquete. Se encarga de las decisiones a escalas temporales de corto plazo sobre la velocidad adecuada de transmisión. En el enlace ascendente cada terminal toma la decisión, mientras que en el enlace descendente la selección del formato de transmisión es función de las necesidades globales y del nivel de carga de las células.
- Traspaso (HO, *Handover*): controla la movilidad del terminal dentro de la red de acceso radio encargándose del traspaso de la comunicación de una estación base a otra, a fin de dar continuidad al servicio de los usuarios móviles. Mantiene la calidad del enlace y minimiza la interferencia con una selección adecuada de las células. Los procedimientos de traspaso tienen un impacto significativo en las estrategias anteriores, que en su diseño deben considerar los efectos del HO.
- Control de congestión (CC, *Congestion Control*): continuamente actualiza la información de la carga de las células controladas por un controlador de estaciones base (RNC) y proporciona dicha información a los mecanismos de AC y PS para la gestión de los recursos radio. En situaciones de sobrecarga, CC realiza las acciones de recuperación utilizando las funcionalidades de PC, AC, PS y HO para intentar reducir la interferencia de una manera inteligente.

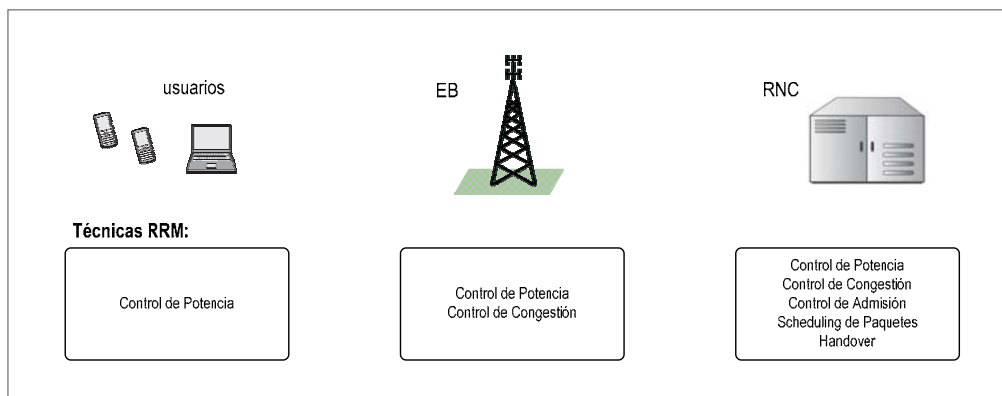


Figura 5. Entidades involucradas en la gestión de recursos radio

2.2.2 Gestión de recursos en la red de transporte

Además de la gestión de recursos en la parte radio, existen un amplio portafolio de soluciones en el mercado para mejorar la eficiencia de la red de transporte. Esto es especialmente importante debido a que, la red de transporte representa una de las partes más costosas para los operadores móviles. Se estima que el coste del *backhaul* representa en torno del 20-25% ([31][32][35]) de los costes totales de las redes de comunicaciones móviles WCDMA. Es por este motivo que es imperativo aprovechar al máximo los recursos existentes.

Actualmente las redes móviles desplegadas soportan cada vez más tráfico de datos y el número de estaciones base se seguirá incrementando. Cabe destacar que la tendencia es que a medida que se implantan nuevas tecnologías de acceso como por ejemplo OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para LTE (*Long Term Evolution*) o WIMAX Mobile (*Worldwide Interoperability for Microwave Access Mobile*), se incrementen aún más los requerimientos de capacidad de transporte los nuevos estándares que se están desarrollando como LTE o WiMAX requerirán todavía más ancho de banda. En este contexto, los fabricantes de equipos están proponiendo distintas soluciones encaminadas a incrementar la eficiencia de la red de transporte permitiendo alcanzar los objetivos que se indican a continuación a la vez que se cumplen los criterios de rendimiento requeridos por el operador respecto a parámetros como pérdida de paquetes, *jitter*, disponibilidad, OAM, ...

- Reducir y controlar los gastos de operación (OpEx).
- Conseguir un CapEx más eficiente.
- Mayor escalabilidad en el transporte, permitiendo una ampliación más rápida y versátil.
- Incrementar la eficiencia del ancho de banda en las EB, con un mejor aprovechamiento de la red de transporte.
- Prepararse para las siguientes tecnologías, estando dispuesto para un despliegue del sistema de nueva generación 4G.
- Desarrollar y generar nuevos servicios. Generar nuevas fuentes de ingresos mediante servicios basados en IP, Wi-fi y Wi-Max en *hotspots* ubicados en las celdas de estaciones base existentes.

A modo de ejemplo se detallan algunas soluciones desarrolladas por los fabricantes Cisco [34][35], Rad [30][31][32] y Ericsson [33], que incorporan tecnologías emergentes (por ejemplo IP/MPLS (*Internet Protocol/ MultiProtocol Label Switching*), *pseudowire*, etc). La relevancia que ha cobrado los últimos años el *backhaul* móvil ha provocado la realización de distintos congresos internacionales y estudios monográficos [36][37]. A continuación se resume brevemente las principales opciones que se barajan. El uso de la tecnología *pseudowire* permite conectar la infraestructura móvil instalada a través de IP, transportando circuitos TDM/ATM de forma transparente a través de redes de conmutación de paquetes PSN (*Packet Switched Network*). Estas soluciones son especialmente adecuadas para el *backhaul* celular ya que proporcionan un túnel de transporte a través de la red de paquetes sin distorsión, transparente para el tráfico subyacente.

Los fabricantes ofrecen equipos capaces de agregar y optimizar el tráfico de los enlaces Abis y Iub. El tráfico comprimido de GSM y UMTS se agrega dinámicamente usando IP sobre el menor número posible de enlaces E1, compartiendo el ancho de banda y aprovechando el ancho de banda recapturado para introducir y transportar nuevos servicios IP en la estación base. Adicionalmente, presentan soluciones para un transporte en un *backhaul* alternativo basado en redes PSN como IP/MPLS, PBB-TE (*Provider Backbone Bridge Traffic Engineering*) y T-MPLS. Mediante el uso de IP como protocolo para el transporte se consigue como principales ventajas una ganancia en la eficiencia, la reducción de las necesidades de ancho de banda, permitir una independencia del suministrador, un desacople entre la tecnología del RAN del transporte y una única convergencia IP para servir al *backhaul* de los sistemas 2G, 3G y 4G.

A su vez Ethernet permite que el *backhaul* sea independiente del medio de transmisión (capa física), de

modo que se pueda implementar sobre xDSL, WiMax, Metro Ethernet, etc, permitiendo una rápida expansión de la red y respondiendo rápidamente a las demandas de crecimiento con opciones de *backhaul* IP de banda ancha de bajo coste. Estas soluciones basadas en redes de paquetes presentan distintos retos en su desarrollo.

2.3 Resumen

En este capítulo se ha presentado la motivación por la cual se contempla en el presente proyecto de fin de carrera el estudio de funciones de gestión de recursos que trabajen de forma conjunta. En particular se considera la idea de incorporar las métricas relativas a la red de transporte dentro de la propia gestión de recursos.

Además, en el presente capítulo se ha descrito de manera breve el estado actual de la red de transporte (*backhaul*), así como las diferentes soluciones tecnológicas que se pueden usar para mejorar la eficiencia en el *backhaul* celular.

3 Problema de Asignación de Base en Redes Móviles

En este capítulo se presenta en primer término una breve revisión del trabajo realizado por otros autores en el contexto de estrategias de asignación de base que han sido propuestas en la literatura científico-técnica. Posteriormente se plantean diferentes estrategias de asignación de base y finalmente se detalla el modelado de la interfaz radio así como la metodología utilizada para el dimensionado de la capacidad de transporte de las estaciones base.

3.1 Revisión de la literatura

El problema de asignación de base en redes celulares ha sido objeto de estudio en una gran variedad de publicaciones. El objetivo de este problema consiste en seleccionar (entre un conjunto de estaciones base), la mejor estación base para dar servicio a cada usuario en la red. Este proceso puede llevarse a cabo cada vez que un nuevo usuario ingresa a la red o bien durante la preparación del procedimiento de traspaso entre celdas de los usuarios móviles activos.

En la literatura podemos encontrar diferentes tipos de estrategias de asignación de base, en las cuales formulan soluciones algorítmicas basadas en criterios de asignación de diferente tipo o considerando varios tipos de restricciones de capacidad. A continuación se detallan las características de las estrategias de asignación que se han localizado en la literatura.

Una de las estrategias más comúnmente utilizadas en las redes actuales se basa en la ganancia existente entre la estación base y el usuario móvil. A esta estrategia se le conoce como *Minimum Path Loss* (MPL) y puede plantearse como un problema de optimización sin restricciones en donde la mejor solución se obtiene asignando cada terminal a la estación base que representa la mayor ganancia de canal. Esta simple estrategia constituye la base de diferentes algoritmos de asignación de base utilizados actualmente en sistemas 2G/3G.

Por otra parte, en [15] se aborda el problema conjunto de asignación de base y control de potencia para el enlace ascendente. La estrategia que se formula tiene por objeto minimizar la potencia del enlace ascendente de cada terminal y además satisfacer el SINR individual de cada usuario. Este problema corresponde a un problema de optimización con restricciones. El algoritmo utilizado para resolver dicho problema es un método iterativo denominado *Minimum Power Assignment* (MPA) y es capaz de encontrar una solución óptima para el enlace ascendente. Además, el MPA permite la inclusión de restricciones adicionales de manera directa. No obstante, este planteamiento no puede ser aplicado directamente para el enlace descendente donde se ha demostrado que no existe una solución Pareto óptima que minimice la potencia individual de cada estación base [18]. Por tanto, mediante la aplicación del marco desarrollado en [15], los autores de [18] proponen un algoritmo para resolver el problema de asignación de base en el enlace descendente, que además, bajo condiciones donde todos los terminales tienen el mismo ruido térmico es capaz de encontrar una solución que minimiza la suma de las potencias de todas las estaciones base en el escenario.

Es importante destacar que las estrategias que se han descrito hasta ahora no consideran explícitamente ningún tipo de restricción de capacidad. Esto sugiere que desde el punto de vista de utilización de

recursos dichas estrategias podrían no conducir a soluciones de asignación eficientes. Este hecho hace aún más patente la necesidad de incorporar restricciones de recursos adicionales en el mismo planteamiento de estrategias de asignación de base más avanzadas.

En el trabajo presentado en [17] se desarrolla un planteamiento de estrategia de asignación que considera que cada usuario debe ser servido con una tasa de binaria mínima. Cada usuario tiene asociado un *profit* y que su asignación implica una cantidad de recursos (de la estación base que le de servicio) para que pueda satisfacer su requerimiento de tasa binaria. Se asume que cada estación base dispone de una capacidad limitada y por tanto para que un usuario sea asignado a una determinada estación base, ésta deberá disponer de suficientes recursos para que el usuario obtenga la tasa binaria deseada. El objetivo del problema planteado consiste en maximizar el *profit* total de las asignaciones de manera que cada usuario satisfaga su requerimiento de tasa binaria y que las estaciones base no excedan la capacidad disponible.

De manera similar a la estrategia anterior, en [21] el problema de asignación de base se formula en conjunción con el problema de asignación de potencia. En particular, el problema se formula como un problema de optimización con restricciones utilizando un marco de funciones de utilidad. El objetivo del problema formulado es maximizar la utilidad total del sistema sujeto a las restricciones de una tasa máxima de transmisión en cada usuario y una potencia máxima de transmisión de potencia en cada estación base. La función de utilidad refleja el nivel de satisfacción de cada usuario respecto la tasa de transmisión asignada que definitivamente está directamente relacionado con la potencia de transmisión de cada terminal.

Makaya y Aïsa [19] investigan el problema de combinar la asignación de base con el *scheduling* de paquetes con el objetivo de maximizar el *throughput* de datos y asegurar el *fairness*, a fin de conseguir un mayor aprovechamiento de los recursos disponibles. Estos mismos autores presentan en [20] un algoritmo en el que se tiene en cuenta el *scheduling* de paquetes para mejorar el funcionamiento del sistema a través de un balanceo dinámico de la carga, mediante el uso de funciones de utilidad.

En la combinación del problema de asignación de EB con el *scheduling* de paquetes también han investigado Navaie y Yanikomeroglu [23] y [24]. Mediante un algoritmo heurístico de tiempo polinomial explotan la diversidad multi-usuario y multi-punto de acceso, mejorando el funcionamiento en término de tasa de paquetes perdidos y *throughput*. Se compara el funcionamiento del método propuesto con métodos de asignación basado en asignar como EB servidora aquella con mayor nivel de E_c/I_0 y los paquetes transmitidos *first-come-first-serve*, y con asignar con mayor E_c/I_0 y los paquetes de forma que se maximice la utilidad en la celda.

De la misma manera que se ha estudiado el problema de la asignación de EB con el *scheduling*, se ha hecho con otros aspectos de la gestión de recursos radio. Shabany y Navaie [25] proponen un esquema de ajuste periódico de la potencia piloto basado en la carga de tráfico de las celdas y el área de cobertura. En este trabajo los recursos se asignan de acuerdo a un esquema de *pricing*. El objetivo es la maximización de la utilidad total del sistema, equivalente a encontrar la asignación óptima de estación base.

3.2 Estrategias de Asignación de Base

En esta sección se detallan tres diferentes estrategias de asignación de base que se han planteado en el presente proyecto de fin de carrera. En particular, se han considerado dos estrategias de referencia que realizan las asignaciones de usuarios atendiendo exclusivamente a aspectos relacionados con la interfaz radio, sin tomar en cuenta las posibles limitaciones del transporte, mientras que la estrategia propuesta incorpora las limitantes del transporte en el proceso de asignación.

3.2.1 Estrategia basada en la Menor Pérdida de Propagación

Este criterio de asignación es el comúnmente utilizado en los sistemas celulares. La estrategia basada en la Menor Pérdida de Propagación asigna a cada usuario aquella estación base que tiene la menor pérdida de propagación existente entre la EB y el usuario (a partir de ahora se referirá como *Minimum Path Loss*, MPL). Esta es la estrategia básica que nos sirve como referencia para comparar el funcionamiento del resto de estrategias de asignación de base.

3.2.2 Estrategia basada en Consumo de Potencia

La segunda estrategia realiza la asignación de cada usuario tomando en cuenta el consumo de potencia (carga radio) de la estación base. En particular se considera que cada estación base dispone de una potencia máxima de transmisión que no debe excederse. Mediante el uso de este tipo de estrategias se pretende balancear la carga radio de las estaciones base, por lo que en este estudio nos referimos a esta estrategia como *Radio-based* (RB).

3.2.3 Estrategia Propuesta: Backhaul-aware

Tanto la estrategia MPL como RB consideran únicamente aspectos relativos a la interfaz radio dentro del proceso de asignación de los usuarios. A diferencia de dichas estrategias, en este trabajo se propone añadir el requerimiento de transporte de las EB como un recurso a considerar en la asignación, de manera que si una de las EB está limitada en ancho de banda, el usuario pueda ser aceptado por otra EB aunque no sea la mejor opción radio.

3.3 Modelado del sistema

La evaluación del problema de asignación de base se ha realizado considerando un sistema celular basado en WCDMA, cuyo modelado se muestra en la Figura 6. El sistema celular se compone por N estaciones base. Se asume que cada una de ellas dispone de una potencia máxima P_T^{\max} y que dispone de una capacidad de transporte máxima C_j^{\max} (que corresponderá al ancho de banda disponible en el enlace que interconecta la estación base con el RNC en el *backhaul*), que es constante en la escala temporal en la que se propone estudiar el problema de asignación de base. Se fija un número M de usuarios en el sistema que pueden establecer la comunicación con cualquiera de las EB que permita una comunicación que cumpla con los requisitos radio. Cada usuario puede establecer un único enlace con una única EB, por lo que no se dispone de la funcionalidad de *soft handover*. Para modelar las

asignaciones a establecer se utiliza una matriz de asignación $B_{ij}=\{b_{ij}\}$ de la estación base j al usuario i , de dimensiones $M \times N$. Los valores que puede tomar la variable de asignación b_{ij} es 1 si el usuario i es asignado a la estación base j , o 0 en caso contrario. Dado que cada usuario sólo puede conectarse a una EB, el sumatorio de cada fila debe ser igual a 1.

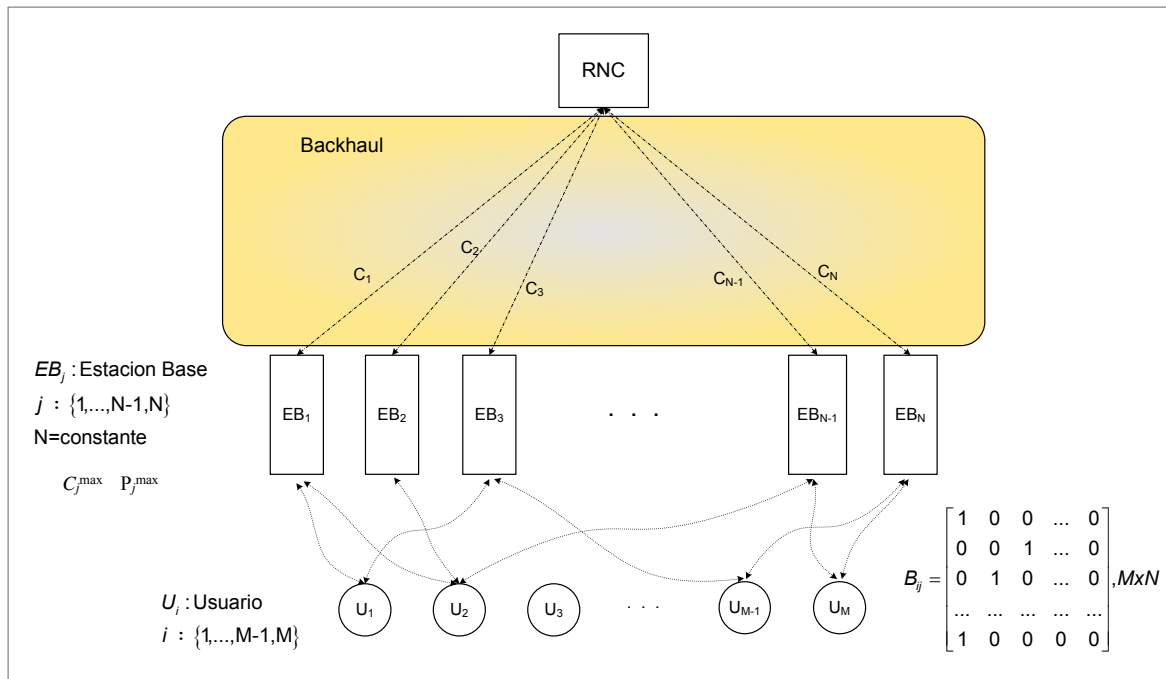


Figura 6. Modelado del sistema considerando recursos radio y transporte

3.4 Modelado de la interfaz radio

El estudio se desarrolla sobre un sistema de comunicaciones móviles WCDMA, en el que la potencia de transmisión utilizada es clave para un correcto funcionamiento del sistema y se debe transmitir cada señal con la mínima potencia necesaria para causar la mínima interferencia posible al resto de señales y obtener la calidad adecuada. La potencia de usuario necesaria no depende únicamente del entorno particular en el que se establece el enlace radio entre el usuario y la estación base sino que también depende de la carga radio en la EB y se debe calcular buscando un valor constante de señal útil a interferente $(E_b/N_0)_i$, objetivo de cada usuario. Los valores umbral se han tomado de [5], que deriva los valores típicos para cada servicio y sentido de la comunicación a partir de los requerimientos de funcionamiento de 3GPP.

3.4.1 Potencia de usuario en el enlace descendente

La potencia de transmisión de un usuario móvil depende principalmente del nivel de interferencia que éste percibe en el entorno. La potencia de usuario en el enlace descendente que asigna la estación base j al usuario i se puede calcular a partir de la siguiente expresión [5]:

$$P_{ij} = \frac{\frac{R_i \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i}{W}}{\left(1 + \frac{R_i \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_i}{W} (1 - \rho_i) \right)} \left((1 - \rho_i) P_j + \sum_{k=1, k \neq j}^N \frac{L_{ij}}{L_{ik}} P_k + L_{ij} P_N \right) \quad (1)$$

En donde:

- P_{ij} : Potencia de transmisión de la estación base j asignada al usuario i
- $(E_b/N_0)_i$: Energía de bit sobre densidad espectral de potencia de ruido mínima requerida
- P_N : Potencia de ruido en el terminal del usuario i
- R_i : Tasa de transmisión de bit el usuario i en el enlace descendente
- W : Tasa de transmisión de chip
- P_j : Potencia total transmitida por la estación base j
- P_k : Potencia total transmitida por la estación base k
- L_{ij} : Pérdidas de propagación entre la estación base j y el usuario i
- L_{ik} : Pérdidas de propagación entre la estación base k y el usuario i
- ρ_i : Factor de ortogonalidad visto por el usuario i (1 significaría una ortogonalidad perfecta)

3.4.2 Potencia de usuario en el enlace ascendente

La potencia empleada por el terminal móvil en el enlace ascendente se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P_{ij,UL} = \frac{R_i \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{i,UL}}{W} \left(\sum_{k=1, k \neq i}^N \frac{L_{ij}}{L_{kj}} P_k + L_{ij} P_N \right) \quad (2)$$

En donde:

- P_{ij} : Potencia de transmisión de la estación base j destinada para servir al usuario i
- $(E_b/N_0)_{i,UL}$: Energía de bit sobre densidad espectral de potencia de ruido mínima requerida
- P_N : Potencia de ruido en el terminal del usuario i
- R_i : Tasa de transmisión de bit el usuario i en el enlace ascendente
- W : Tasa de transmisión de chip
- P_k : Potencia transmitida por el usuario k
- L_{ij} : Pérdidas de propagación entre la estación base j y el usuario i
- L_{kj} : Pérdidas de propagación entre el usuario k y la estación base j

3.4.3 Modelo de propagación

Para el cálculo de la atenuación se ha utilizado el modelo de propagación presentado en [8], aplicable para un entorno macrocelular urbano, cuya expresión es:

$$L_p[dB] = 128.1 + 37.6 \cdot \log_{10}(d[Km]) + S[dB] \quad (3)$$

Donde S [dB] modela los desvanecimientos lentos, es decir las pérdidas de nivel provocadas por zonas de sombra (*shadowing*), y sigue una función densidad de probabilidad lognormal. Estos desvanecimientos son debidos a grandes obstáculos (montañas, edificios, árboles, etc.), en general aquellos objetos que no permiten la visión directa entre emisor y receptor. El valor de la desviación estándar depende del tipo de entorno.

3.5 Modelado de la red de transporte

La red de transporte se modela mediante un dimensionado basado en la estimación de la capacidad radio (*pole capacity*) de cada estación base en el enlace descendente. Dicha capacidad de tráfico a nivel radio se calcula para un servicio con una tasa binaria determinada y asumiendo ciertas condiciones de interferencia en la interfaz radio. A partir del valor obtenido de la capacidad radio de la estación base se realiza una estimación del ancho de banda necesario para soportar el tráfico estimado, proporcional a la *pole capacity*.

3.5.1 Cálculo de la Capacidad Radio

La capacidad radio en una estación base se determina a partir de la carga radio en el enlace descendente:

$$C_{air,p} = M_j \cdot R_i \leq \frac{W}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_i ((1-\rho) + f_{DL})} \quad (4)$$

En donde:

- M_j : Número de usuarios servidos por la estación base j
- R_i : Tasa de transmisión binaria de los usuarios i
- $\rho = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} \rho_i$: Promedio del factor de ortogonalidad en la celda
- $f_{DL} = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} f_{DL,i}$: Promedio del ratio de la potencia recibida por los usuarios del resto de EB

En el cálculo de la $C_{air,p}$ (*pole capacity*) se han considerado dos diferentes tasas de transmisión de datos: 128Kbps y 384Kbps. Para calcular la *pole capacity* de acuerdo a la ecuación (4) se han considerado los siguientes valores, en línea con las recomendaciones de [5]:

- $\rho_i = 0,5$: factor de ortogonalidad
- $f_{DL} = 0,65$: promedio del ratio de la potencia recibida por los usuarios del resto de EB
- $(E_b/N_0)_i$: energía de bit sobre densidad espectral de potencia de ruido mínima requerida
- $(E_b/N_0)_i = 5,3$ para $R_b = 128$ Kbps

- $(E_b/N_0)_i = 5,2$ para $R_b = 384$ Kbps.

Posteriormente se redondea al múltiplo de la tasa de transmisión de mayor bit, ya que será el valor a partir del que se determina la capacidad de transporte asignada a cada EB, y que debe admitir a un número entero de usuarios.

En la Tabla 1 se presenta la *pole capacity* para cada tipo de usuarios en función de su tasa binaria y se fija el valor de la capacidad radio de modo que sea múltiplo de R_b .

	$R_{bDL}=128$ Kbps	$R_{bDL}=384$ Kbps
$C_{air,p}$ [Kbps]	985,45	1008,40
M_j	8	3
$C_{air,pole}$ múltiplo R_{bDL} [Kbps]	1024	1152

Tabla 1. Parámetros para el cálculo de la capacidad radio

3.5.2 Metodología de Dimensionado

La capacidad de transporte requerida para cada una de las estaciones base en el sistema se determina a partir de la *pole capacity*. Como se indica en el apartado 3.5.1, se realiza una estimación de la capacidad radio en el enlace descendente y se redondea al múltiplo superior más próximo de R_b . Posteriormente, se aplica un factor multiplicador Φ que modela el extra de ancho de banda de transporte que se desea aplicar a la estación base.

$$C_j^{\max} = \phi \cdot C_{air,pole} \quad (5)$$

La Tabla 2 muestra un resumen de los valores de capacidad de transporte obtenidos para distintos valores del factor de multiplicación Φ :

Φ	Capacidad de transporte EB [Kbps]	
	$C_{air,pole} = 1024$ Kbps $R_{bDL} = 128$ Kbps	$C_{air,pole} = 1152$ Kbps $R_{bDL} = 384$ Kbps
1	1024	1152
1,5	1536	1728
2	2048	2304
2,5	2560	2880
3	3072	3456

Tabla 2. Capacidad de transporte en función de Φ

En este contexto $\Phi=1$ significaría que la capacidad de transporte se ha dimensionado para satisfacer la capacidad radio del enlace descendente estimada en el proceso de planificación. A medida que aumenta el factor multiplicador Φ , se sobredimensiona el ancho de banda dedicado en cada EB.

3.6 Formulación del problema

El problema de asignación de base se formula como un problema de optimización en el que la cantidad de recursos que se requieren en la interfaz radio debe ser minimizada sin que se excedan las capacidades radio y transporte en cada estación base. Este problema puede plantearse como:

$$\max_B \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N U_i(R_{ij})b_{ij} \right) \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^M P_{ij}b_{ij} \leq P_T^{\max}, \forall j \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^M R_{ij}b_{ij} \leq C_j^{\max}, \forall j \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^N b_{ij} \leq 1, \quad j=1 \dots N, \quad i=1 \dots M \quad (9)$$

$$b_{ij} \in \{0,1\} \quad (10)$$

En donde:

- U_i : Utilidad total del sistema (suma de las utilidades de los usuarios)
- R_{ij} : Tasa de transmisión del usuario i en el enlace descendente
- P_{ij} : Potencia de transmisión en el enlace descendente entre el usuario i y la estación base j
- b_{ij} : Valor de la asignación entre el usuario i y la estación base j
- P_T^{\max} : Potencia máxima de transmisión en el enlace descendente.
- C_j^{\max} : Capacidad máxima de transporte

3.7 Análisis de complejidad del problema

El problema de asignación de base es difícil de abordar y su resolución conlleva una complejidad significativa. La razón principal de ello radica en la estrecha relación que existe entre la asignación de base para cada usuario en el sistema y la cantidad de recursos asignados a los terminales móviles. En particular, la cantidad de recursos (potencia) en el enlace descendente a asignar a cada usuario depende de la tasa binaria requerida, el nivel de calidad de servicio a satisfacer y del nivel de interferencia recibido. A su vez, el nivel de interferencia que percibe cada usuario depende de su posición absoluta en el sistema respecto la estación base que le da servicio, así como también del resto de las asignaciones en el sistema.

Por lo tanto, la solución de asignación de base depende de la potencia asignada a los usuarios. Igualmente, para determinar la potencia de cada usuario se debe conocer el nivel de interferencia que éste tiene, es decir, es necesario conocer las asignaciones del resto de usuarios en el sistema.

Estas características inherentes al problema de asignación de base en el enlace descendente hacen que sea muy compleja su resolución. En este sentido, para hacer abordable este problema se asumen determinadas simplificaciones.

En este trabajo el cálculo de potencia de cada usuario se realiza asumiendo que cada estación base transmite a máxima potencia, es decir, que el sistema se encuentra totalmente cargado. Por lo tanto el cálculo de potencia se realiza fácilmente dado que el cálculo del nivel de interferencia no es dependiente de la solución de asignación. Cabe destacar que esta suposición es ampliamente utilizada en la literatura para simplificar el problema de asignación de base.

4 Algoritmos Propuestos

4.1 Algoritmo basado en Simulated-Annealing

Para resolver el problema de asignación de estación base planteado en el capítulo anterior se presenta un algoritmo basado en Simulated Annealing (SA) que nos permite encontrar una asignación factible mediante la maximización de la utilidad global del sistema. Mediante este algoritmo se plantea resolver el problema de optimización de manera que se busca iterativamente una asignación factible de los usuarios en el sistema, buscando maximizar la utilidad total sujeto a que se cumplan los requerimientos de potencia y capacidad de transporte de las EB. Mediante Simulated Annealing el problema de asignación de base planteado en el capítulo anterior se resuelve como un problema sin restricciones.

4.1.1 Antecedentes de Simulated Annealing

Kirpatrick, Gelatt y Vecchi propusieron en 1983 un procedimiento para obtener soluciones aproximadas a problemas de optimización, llamado Simulated Annealing (en castellano Templado Simulado) [11]. Este procedimiento se basa en una analogía con el comportamiento de un sistema físico al someterlo a un aumento de temperatura. Simulated Annealing ha sido probado con éxito en numerosos problemas de optimización, mostrando gran "habilidad" para evitar quedar atrapado en óptimos locales. Debido a su sencillez de implementación así como a los buenos resultados que iban apareciendo, experimentó un gran auge en la década de los 80.

Kirpatrick y otros, trabajando en el diseño de circuitos electrónicos, consideraron aplicar el algoritmo de Metrópolis [12] en alguno de los problemas de optimización combinatoria que aparecen en este tipo de diseños. El algoritmo de Metrópolis simula el cambio de energía en el proceso de enfriamiento de un sistema físico. Las leyes de la termodinámica establecen que, a una temperatura t , la probabilidad de un aumento de energía de magnitud ∂E viene dada por la expresión siguiente:

$$P(\partial E) = e^{-\frac{\partial E}{kT}} \quad (11)$$

Donde k es la constante de Boltzmann. En este sentido, la simulación de Metrópolis genera una perturbación y calcula el cambio resultante en la energía. Si la energía decrece, el sistema se mueve a un nuevo estado, mientras que en caso contrario se acepta el nuevo estado de acuerdo con la probabilidad dada en la ecuación anterior.

En este contexto, Kirpatrick y otros autores pensaron que era posible establecer una analogía entre los parámetros que intervienen en la simulación termodinámica de Metrópolis y los que aparecen en los métodos de optimización local. Para ello, establecen un paralelismo entre el proceso de las moléculas de una sustancia que van colocándose en los diferentes niveles energéticos buscando un equilibrio, y las soluciones visitadas por un procedimiento de búsqueda local. Así pues, SA es un procedimiento basado en búsqueda local en donde todo movimiento de mejora es aceptado y se permiten movimientos de no mejora de acuerdo con unas probabilidades. Dichas probabilidades están basadas en la analogía con el proceso físico de enfriamiento y se obtienen como función de la temperatura del sistema.

Los parámetros involucrados en el diseño y calibración del algoritmo basado en SA son la temperatura inicial, la temperatura final, la actualización de la temperatura y el número máximo de iteraciones y el criterio de parada. La técnica de SA consiste en comenzar con una temperatura inicial alta a fin de tener una probabilidad alta de aceptación de un movimiento de no mejora. En cada iteración la temperatura se reduce para que las probabilidades sean cada vez más pequeñas, siendo más difícil aceptar malos movimientos, conforme el procedimiento avanza hacia la solución óptima. De este modo, el algoritmo SA tiene la habilidad de salir de óptimos locales al aceptar movimientos de no mejora en los estados intermedios. Al final del proceso éstos son tan poco probables que no se producen, con lo que, si no hay movimientos de mejora, el algoritmo finaliza.

4.1.2 Funciones de Utilidad

Para cada una de las estrategias de asignación de base planteadas en la sección 3.2, en la presente sección se define una función de utilidad para reflejar el nivel de cumplimiento al criterio de asignación correspondiente de cada estrategia. Las funciones definidas son monótonas decrecientes y cóncavas, cuyo valor decrece de acuerdo a un exponente cuadrático. En este tipo de funciones el valor absoluto de su derivada se incrementa progresivamente y se mueve hacia la condición de mínima utilidad, mostrando variaciones suaves cuando se acercan a la región de máxima utilidad.

4.1.2.1 Minimum Path Loss (MPL)

La función de utilidad u_{ij} para la estrategia MPL se ha definido de forma que se proporcione el máximo valor cuando el usuario i sea asignado a la estación base j respecto al cual se obtengan las menores pérdidas de propagación. Por el contrario la utilidad decrece si el usuario i se asigna a estaciones base hacia las que se obtenga mayores pérdidas de propagación. Cabe destacar que para esta estrategia no se considera ningún otro aspecto de potencia o transporte. Se formula de la siguiente manera:

$$u_{ij} = 1 - \left(\frac{\min(L_{ij} - L_{i,bs}, \Delta)}{\Delta} \right)^2 \quad (12)$$

Nótese que en esta expresión el valor de la utilidad dependerá de la diferencia de las pérdidas de propagación de la estación base candidata (L_{ij}) respecto las pérdidas de propagación de la mejor servidora (*best server* $L_{i,bs}$). El parámetro Δ se utiliza para limitar las posibles alternativas de asignación (estaciones base candidatas). En particular todas aquellas EB cuyas pérdidas de propagación sean superiores a un margen de $\Delta=6$ dB no serán consideradas candidatas (la utilidad resultante de la asignación es nula).

4.1.2.2 Radio-Based (RB)

En el caso de *Radio-Based* se incluye la restricción de la potencia máxima disponible en las estaciones base. Por este motivo, en la formulación de la función de utilidad se incorpora dicho factor, de modo que, a medida que la carga radio (potencia total consumida) en la estación base j incrementa, la utilidad que resulta de la asignación de un usuario i hacia una estación base j sería baja.

$$u_{ij} = \left(1 - \left(\frac{\min(L_{ij} - L_{i,bs}, \Delta)}{\Delta} \right)^2 \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\min(P_T^j - P_T^{\max})}{P_T^{\max}} \right)^2 \right) \quad (13)$$

4.1.2.3 Backhaul-Aware (BA)

Finalmente la función de utilidad definida para la estrategia propuesta *Backhaul-Aware* incorpora las restricciones radio y transporte de la estación base. La expresión de la utilidad definida para el usuario i respecto la EB j es::

$$u_{ij} = \left(1 - \left(\frac{\min(L_{ij} - L_{i,bs}, \Delta)}{\Delta} \right)^2 \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\min(P_T^j - P_T^{\max})}{P_T^{\max}} \right)^2 \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{\min(R^j, C^j)}{C^j} \right)^2 \right) \quad (14)$$

A diferencia de la función de utilidad definida para la estrategia RB, la función de utilidad de la estrategia BA introduce un término dependiente del agregado de tráfico en cada estación base y capacidad de transporte máxima disponible. En particular, R_j es la sumatoria de las velocidades de transmisión de los usuarios que están siendo servidos por la estación base j , y C_j es la capacidad de transporte de que dispone la EB. Mediante esta fórmula, aquella asignación con una EB con elevado consumo de potencia o transporte implicará una utilidad menor, con lo que se considerará peor para el sistema en global.

4.1.3 Funcionamiento del Algoritmo de SA

El algoritmo de asignación basado en SA tiene por objeto encontrar una solución de asignación factible en la que se cumplan las restricciones de potencia y de transporte (definidas en las expresiones (7) y (8)) en el problema de asignación de base formulado en la sección 3.6 para una determinada realización, maximizando la utilidad total del sistema.

El pseudo-código del algoritmo basado en SA se muestra en la Tabla 3. Como se puede apreciar, la búsqueda de una solución factible parte de una asignación inicial de usuarios obtenida a partir de aplicar el criterio de MPL (es decir, cada usuario es asignado a la estación base hacia la que se obtienen las menores pérdidas de propagación). En esta etapa inicial del algoritmo se establece una temperatura inicial del sistema definida como T_0 , un parámetro de calibración del algoritmo importante ya que una temperatura demasiado elevada conduciría a un mayor número de iteraciones del algoritmo.

El algoritmo iterativo concluye una vez que se cumple el criterio de parada fijado o bien cuando se alcanza el equilibrio térmico, es decir que la variación del parámetro de temperatura entre una iteración y la siguiente no sufre cambios significativos, por lo que se considera que el sistema se ha equilibrado. Además, se considera un número máximo de iteraciones a fin de eliminar el tiempo de búsqueda del algoritmo.

En cada iteración del algoritmo:

- Se calcula la utilidad de cada usuario respecto cada estación base en el conjunto de estaciones base candidatas.
- Se determina si existe otra estación base donde cada usuario tendría una utilidad mayor (incremento de utilidad).

- Se selecciona la asignación usuario- estación base con mayor incremento de utilidad y se realiza la reasignación.
- Se obtiene la utilidad total del sistema y se compara con la previa.
- Si el incremento de utilidad es positivo se acepta la nueva asignación y se actualiza la matriz de asignación. En el caso contrario se acepta con una determinada probabilidad. La función de probabilidad exponencial permite controlar los movimientos de escape hacia soluciones peores a la iteración anterior, y a medida que el algoritmo avanza en la búsqueda de la solución se disminuye la probabilidad de aceptar soluciones de no mejora.
- Se actualizan los diferentes parámetros y estadísticas.

```

Cálculo inicial  $B=\{b_{ij}\}$  y  $T_0$ 
while no se alcanza un equilibrio térmico o el criterio de parada
  while no se alcanza número máximo de iteraciones o el criterio de parada
    Obtención nueva  $B'$ ;
    Cálculo  $\delta = U(B') - U(B)$ 
    if  $\delta > 0$  then
       $B = B'$ ;
    else
      if  $\text{random}(0,1) < e^{(-\delta/T)}$  then
         $B = B'$ ;
      end_if
    end_if
    Actualizar número de iteraciones;
  end_while
  Decrementar  $T$  de acuerdo al algoritmo;
end_while

```

Tabla 3. Pseudo código del algoritmo SA

4.1.3.1 Análisis parámetros SA

La solución generada por un algoritmo basado en SA es fuertemente dependiente de los parámetros de diseño de la secuencia de enfriamiento, que influyen decisivamente en un correcto funcionamiento del algoritmo. El principal parámetro de control del algoritmo es la temperatura T , la cual decrece de acuerdo a la función de probabilidad $e^{(-\delta/T)}$. Para que el algoritmo encuentre una solución óptima la temperatura debe decrecer a una velocidad suficientemente lenta para permitir los movimientos de escape de la función de probabilidad, a la vez que se alcanza un compromiso con el tiempo de cálculo empleado.

En el calibrado del algoritmo se han analizado los principales parámetros del algoritmo:

- Temperatura inicial T_0 del algoritmo: Se asigna una temperatura inicial, cuyo valor se decrementa a medida que el algoritmo avanza en la búsqueda de una solución factible. Como se ha comentado anteriormente, la temperatura inicial utilizada debe ser suficientemente alta como para que la función de probabilidad exponencial permita una alta probabilidad de aceptar movimientos que conduzcan a una peor asignación.
- Actualización de la temperatura T en cada bucle debe reducirse a pequeños saltos. Sin embargo,

para garantizar un óptimo global requeriríamos un número muy elevado de iteraciones, por lo que se toma una función de decrecimiento α . De entre las posibles funciones que recomiendan los estudios realizados [10], y que permiten obtener soluciones similares, se ha optado por la que marca una velocidad de enfriamiento geométrico $T = \alpha.T$, y se han realizado pruebas con valores comprendidos entre $0.8 < \alpha < 0.99$.

- Temperatura final T_F del algoritmo: Se ha buscado un compromiso entre el valor de la temperatura final utilizada (suficientemente bajo para alcanzar un óptimo local) y el tiempo de ejecución del algoritmo. A mayor temperatura final, mayor es el tiempo empleado para obtener el resultado.
- Número máximo de iteraciones K_{max} para cada temperatura: con el fin de limitar el espacio de búsqueda de la solución factible se limita el número máximo de iteraciones realizadas en cada valor de temperatura fijado en el bucle *while* exterior. Este valor puede ser fijo o incrementarse a medida que disminuye la temperatura para dedicar el tiempo necesario.
- Criterio de parada: el algoritmo se ejecuta mientras no se obtenga una solución factible. Por lo tanto, una vez el algoritmo encuentra una solución factible se detiene su ejecución..

Una evaluación inicial del algoritmo basado en SA para resolver el problema de asignación de base ha sido presentado en [2]. Para la obtención de resultados se ha realizado una calibración de los diferentes parámetros del algoritmo. Debido al elevado cálculo computacional requerido, que se traduce en un tiempo de cálculo mayor, se han limitado el número de iteraciones máximas. A continuación se presentan distintas calibraciones de los parámetros del algoritmo, realizadas con el objetivo de conseguir un compromiso entre la obtención de una solución y el tiempo de procesado.

Número de iteraciones limitado.

Inicialmente se ha constatado que para un menor número de usuarios en el sistema el algoritmo requiere un menor número iteraciones, por lo que se ha fijado el número máximo de iteraciones en función del número de usuarios en el sistema. De este modo, cuando el número de usuarios es menor a 10 se establece inicialmente un $K_{max}=4$, y para un número de usuarios superior el número de iteraciones máximo se incrementa de forma proporcional $K_{max}=0,35*\text{número de usuarios}$. Para un número en particular de usuarios, una vez que se ejecuta el bucle, y antes de decrementar la temperatura, se reduce el número máximo en cada bucle para cada temperatura de manera proporcional con un factor de proporcionalidad f .

En este primer conjunto de parámetros los valores fijados han sido de:

- $T_0=99.499$
- $T_F=0.3007$
- $\alpha=0,8$ factor de decrecimiento de la temperatura (el más rápido dentro del margen de valores recomendados).
- $f=0,4$: factor de proporcionalidad del número de iteraciones máximas dentro del bucle.

A modo de ejemplo, con estos valores, el número máximo de iteraciones que pueden llegar a realizarse en el bucle principal es de $K_T=27$ (des de la temperatura inicial hasta que se llega a la temperatura final con este factor de decrecimiento). Dentro del bucle, dado que se va decreciendo el número de iteraciones

con un factor f de 0.4, el número de iteraciones es muy bajo, por ejemplo, hasta los 42 usuarios únicamente se realizan 2 iteraciones y sólo para valores superiores a 112 de usuarios en el sistema el número asciende a 4.

Reasignación aleatoria

Otro método para el algoritmo basado en SA consiste en usar una reasignación de los usuarios con las EB que se realice aleatoriamente y salga del bucle cuando es factible.

Maximización de la función objetivo

También se puede usar un algoritmo SA con reasignación basada solamente en la maximización de la función objetivo, sin salir con la primera solución factible. En este supuesto, el algoritmo busca entre el espacio de soluciones factibles a aquella que proporciona la máxima utilidad del sistema.

El número máximo de iteraciones deberá ser siempre fijo (proporcional al número de usuarios) sin que se vaya reduciendo en el bucle interno. También se puede modificar la temperatura mínima (de enfriamiento) y que en el bucle la temperatura decrezca a menor velocidad. En este segundo caso se han fijado los parámetros según los siguientes valores:

- $T_0=99.499$ (igual valor)
- $T_F=0.3028$ (mayor temperatura final)
- $\alpha=0,9$ factor de decrecimiento de la temperatura más lento.
- $f=6$: factor de proporcionalidad para calcular K_{max} iteraciones.

Para este caso el número máximo de iteraciones del bucle principal asciende a $K_T=56$ y en el bucle interior por ejemplo, el número de iteraciones es de $K_{max}=150$ para 25 usuarios o $K_{max}=600$ para 100 usuarios.

En resumen, a partir del análisis del algoritmo y sus parámetros se ha podido constatar como el número máximo de iteraciones tiene una fuerte dependencia del manejo de la secuencia de enfriamiento y los valores escogidos, existiendo distintos métodos para minimizar el coste computacional pero a costa de reducir la fiabilidad de los resultados obtenidos.

4.1.4 Complejidad Computacional

En este apartado se analiza la complejidad computacional del algoritmo de SA propuesto para resolver el problema de asignación de base. La complejidad computacional del algoritmo se calcula para el "peor caso" que proporciona la cota superior de iteraciones que realizaría el algoritmo para encontrar una solución factible. Para determinar la complejidad del algoritmo de SA se ha considerado las siguientes variables: M usuarios en el sistema, N_A estaciones base candidatas y N estaciones base del sistema.

El algoritmo SA mostrado en la Tabla 4 consta de un bucle principal que se repite mientras no se haya obtenido una solución de asignación factible o bien hasta que se alcance el equilibrio térmico (es decir que la variación del parámetro de temperatura entre una iteración y la siguiente no sufre cambios significativos, por lo que se considera que el sistema se ha equilibrado).

En el peor de los casos el algoritmo realizaría K_T iteraciones para encontrar una solución de asignación factible. El valor de K_T dependerá de los valores de temperatura inicial T_0 , α enfriamiento y temperatura final T_F que estén siendo utilizados en el algoritmo. Por otra parte, el bucle interior del algoritmo podría realizar como máximo K_{max} iteraciones. Por lo tanto, la complejidad total de ambos bucles sería de $O(K_T \cdot K_{max})$. Mientras que K_T toma un valor fijo, K_{max} depende de la temperatura en cada bucle (los valores empleados se han analizado en el apartado 4.1.3.1).

En cada iteración del algoritmo se obtiene una nueva matriz de asignación y debe calcularse los incrementos de utilidad, la reasignación, el cálculo de potencias, la utilidad y comprobar si es factible. Se compone de $O(q \cdot M \cdot N)$, ya que para el cálculo de las potencias de usuario se fija un número máximo de iteraciones q , por lo que la complejidad del cálculo de la potencia en el enlace descendente los usuarios en el sistema es de $O(q \cdot M \cdot (N-1)) + O(C)$.

En Tabla 4 se detallan el resto de procesos y la complejidad computacional que conlleva su ejecución:

Fase	Paso	Complejidad
	Bucle hasta alcanzar equilibrio térmico o criterio de parada	$O(K_T)$
	Bucle hasta alcanzar número máximo de iteraciones o criterio de parada	$O(K_{max})$
Obtención nueva B	Cálculo incrementos de utilidad	$O(M \cdot N_A)$
	Reasignación de usuario	$O(C)$
	Cálculo potencias en DL	$O(q \cdot M \cdot (N-1)) + O(C)$
	Cálculo de utilidades	$O(M) + O(M) + O(N)$
	Comprobación asignación factible	$O(C)$
	Actualización b_{ij} , número iteraciones y decremento temperatura	$O(C)$

Tabla 4. Cálculo complejidad computacional del algoritmo SA

Por lo tanto, se concluye que el algoritmo presentado basado en SA tiene una complejidad computacional total de:

$$[O(M \cdot N_A) + O(q \cdot M \cdot (N-1)) + 2 \cdot O(M) + O(N) + O(C)] \text{ bucle } O(K_T \cdot K_{max}) \quad (15)$$

$$\square K_T \cdot K_{max} [M \cdot (N_A \cdot q \cdot (N-1) + 2) + N + C] \square O(K_T \cdot K_{max} \cdot q \cdot M \cdot N)$$

4.2 Algoritmo de Asignación Basado en Costes

En esta sección se presenta un algoritmo de asignación basado en el coste de recursos, el cual se plantea como un problema de optimización. Posteriormente, después de considerar una serie de simplificaciones prácticas, el problema de optimización formulado se “mapea” a un problema de

optimización combinatoria conocido como MMKP (*Multidimensional Multiple-choice Knapsack Problem*). Finalmente, se detalla el algoritmo heurístico desarrollado para resolver el problema MMKP.

4.2.1 Planteamiento de Problema de Optimización

Uno de los principales inconvenientes observados en el algoritmo de asignación basado en SA es que al generar una nueva solución de asignación de base (a partir de la reasignación de un usuario) era necesario recalcular los valores de potencia de todas las asignaciones de usuarios en el sistema. Nótese que esto se debe a que en el enlace descendente de un sistema WCDMA existe una dependencia mutua entre las asignaciones de usuarios y el valor de potencia de cada usuario. En particular, al reasignar un usuario se modifican los niveles de interferencia percibidos por el resto de usuarios en el sistema y por tanto es posible que la potencia de transmisión requerida (para mantener el E_b/N_0 de cada usuario) cambie igualmente.

En este contexto, en este capítulo se pretende desarrollar un algoritmo de asignación de estación base cuyos parámetros de funcionamiento no dependan de la solución de asignación del resto de usuarios en el sistema. Con este fin, se ha supuesto que cada usuario que requiera ser atendido por una estación base tendrá garantizada una determinada tasa binaria R_i , tanto en la interfaz aire como en la red de transporte. La idoneidad de una determinada asignación se evalúa por medio del cálculo de dos indicadores de costes de recursos: (a) un coste de radio en función de la potencia de transmisión requerida en la interfaz y, (b) un coste de transporte dependiente de la tasa binaria requerida en la red de transporte. La formulación exacta de estos dos parámetros se indica en los siguientes subapartados.

4.2.1.1 Funciones de coste

Coste Radio

El coste de recursos en la interfaz radio se puede definir como la fracción de potencia utilizada por el usuario i de la potencia máxima de transmisión disponible en la estación base j :

$$\alpha_{ij} = \frac{P_{ij}^{max}}{P_j^{max}} \quad (16)$$

Donde P_j^{max} es la potencia máxima transmisión de la estación base, y P_{ij}^{max} es la potencia de transmisión del usuario i , la cual se calcula mediante la expresión (1) indicada en el apartado 3.4.1.

Se asume que el sistema se encuentra totalmente cargado, es decir, que todas las estaciones base en el sistema se encuentran transmitiendo a máxima potencia de modo que la función de coste de recursos no sean no lineales.

Coste de Transporte

Por otra parte, el coste de recursos de transporte de la asignación del usuario i en la estación base j se define como el cociente de la tasa de transmisión requerida por el usuario i , denotada como R_i respecto la capacidad de transporte disponible en la estación base j , referida como C_j^{max} .

$$\beta_{ij} = \frac{R_i}{C_j^{max}} \quad (17)$$

El valor de capacidad de transporte de cada estación base se calcula mediante el procedimiento detallado en la sección 3.5.

4.2.1.2 Formulación del problema

A partir de la definición de las funciones de coste de recursos radio y transporte, se formula el problema de optimización siguiente:

$$\max_{b_{ij}} \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N u_{ij} b_{ij} \right) \quad (18)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^M \alpha_{ij} b_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, M \quad i = 1, \dots, N \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^M \beta_{ij} b_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, M \quad i = 1, \dots, N \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^N b_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, M \quad i = 1, \dots, N \quad (21)$$

$$b_{ij} \in \{0, 1\} \quad (22)$$

En este problema de optimización, la función de utilidad u_{ij} es inversamente proporcional al consumo de recursos radio α_{ij} del usuario i respecto la estación base j . Por lo tanto, el problema de optimización planteado tiene por objeto minimizar el consumo de recursos radio de todas las asignaciones de usuarios. Además, el conjunto de ecuaciones (20) y (21) permiten garantizar que la demanda de recursos no excede el máximo de recursos radio/transporte disponible en las estaciones base. Nótese que en estas expresiones el límite máximo de recursos es 1 debido a que los costes de recursos radio y transporte son valores normalizados. Por otra parte, mediante la inclusión de la condición (22) se impide que se realicen asignaciones múltiples de un usuario hacia diferentes estaciones base.

El algoritmo basado en SA, presentado en la sección 4.1, cada vez que efectúa un cambio en la asignación de un usuario es necesario recalcular los valores de potencia de todos los usuarios. Por el contrario, el algoritmo basado en costes, al considerar que todas las EB del sistema están cargadas al máximo, no requiere calcular iterativamente las potencias y disminuye el tiempo de cálculo de una solución. Nótese que si se considera que todas las EB están cargadas al máximo, es análogo a la estrategia MPL.

4.2.2 Mapeo del Problema a un MMKP

El problema de optimización planteado puede ser representado como un problema de optimización

combinatoria denominado MMKP [29]. Tal como se muestra en la Figura 7, el problema MMKP está compuesto por un *knapsack* (mochila en español) multidimensional, que consta de un conjunto de grupos y un número determinado de elementos contenidos en cada grupo. El *knapsack* dispone de W recursos en cada dimensión K y la cantidad de recursos disponibles en todas las dimensiones del *knapsack* se representa mediante el vector (W_1, W_2, \dots, W_K) . La selección de cada elemento j contenido en un grupo i tiene asociada cierta utilidad u_{ij} y a su vez requiere una cantidad de recursos de cada dimensión, esto es $(w_{ij1}, w_{ij2}, \dots, w_{ijK})$. El objetivo del problema MMKP consiste en seleccionar únicamente un elemento de cada grupo de forma que se maximice la utilidad total de los elementos seleccionados, sin que se exceda la capacidad total del *knapsack*.

El problema de asignación de base formulado en (19)-(23) es equivalente al problema MMKP si se toman en cuenta las siguientes consideraciones.

- La red celular compuesta por N estaciones base es el *knapsack*.
- El número total de dimensiones sería $K=2N$ debido a que cada estación base cuenta con restricción de recursos en la interfaz radio y en la red de transporte.
- Los usuarios móviles son los i grupos.
- Los elementos contenidos en cada grupo corresponden a las estaciones base que se encuentran en el active-set n_j de cada usuario.

De esta forma, el objetivo consiste en asignar a cada usuario (grupo i) una EB (elemento de grupo j) de forma que se maximice la utilidad resultante, a la vez que los costes de recursos totales asociados a la asignación de todos los usuarios no superen las restricciones de recursos radio/transporte de cada estación base. Por lo tanto, el problema de asignación de recursos corresponde a un problema MMKP.

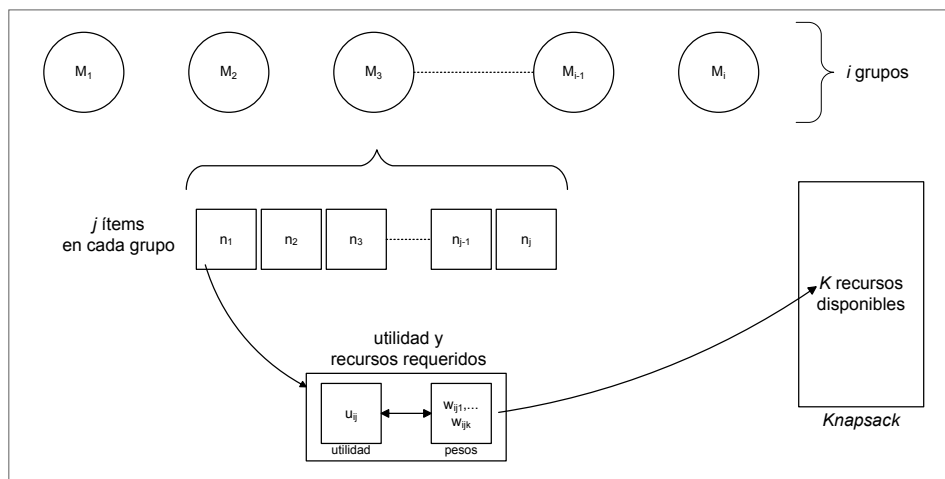


Figura 7. Representación gráfica del MMKP

No obstante, debemos tomar en consideración el hecho de que la asignación de todos los usuarios no siempre será factible. Por ejemplo, en el supuesto de que exista un número elevado de usuarios en el sistema, las estaciones base podrían no disponer de suficientes recursos (radio y/o transporte) para dar servicio a todos los usuarios. Previendo esta situación, y debido a que el problema MMKP condiciona a

que de cada grupo debe seleccionarse un elemento, se ha añadido un elemento "nulo" a cada grupo, cuya selección tendría asociada una utilidad y coste radio/transporte igual a cero. En otras palabras, la "asignación" de un usuario i a una estación base nula significaría que el usuario i no ha sido aceptado por la red.

4.2.3 Funcionamiento del Algoritmo

Una vez que se ha planteado el problema de asignación de recursos en la forma de un MMKP, es posible utilizar alguno de los diversos métodos existentes en la literatura para resolver el problema del *knapsack*. En particular, existen dos clases de algoritmos para resolver el MMKP: exactos y heurísticos. Los algoritmos exactos conllevan un alto nivel de complejidad computacional para encontrar la solución óptima del problema y por tanto no son recomendables para aplicaciones en tiempo real. En contraposición a los métodos exactos, se pueden utilizar algoritmos heurísticos capaces de obtener una buena aproximación a la solución pero el tiempo invertido para encontrar la solución es de un orden de magnitud muy inferior al de un algoritmo exacto.

En este contexto para resolver el problema de asignación de base, en el presente Proyecto de Fin de Carrera se ha utilizado el algoritmo desarrollado en [1], el cual consiste en un algoritmo heurístico de tiempo polinomial que fue desarrollado en [1] a partir de [13]. El algoritmo se basa en el uso del Teorema de Multiplicadores de Lagrange [14] Antes de detallar el algoritmo heurístico utilizado, es necesario explicar el teorema de los multiplicadores a fin de que se comprenda la teoría sobre la que se fundamenta el algoritmo utilizado. Sean $\lambda_1 \dots \lambda_N$ y $\mu_1 \dots \mu_N$ valores no negativos de multiplicadores de Lagrange (ML), y sea $b_{ij}^* \in \{0, 1\}$ la solución de asignación a una matriz de asignación existente b_{ij} :

$$\max_{b_{ij}} \left\{ \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N u_{ij} b_{ij} \right) - \sum_{j=1}^N \lambda_j \sum_{i=1}^M \alpha_{ij} b_{ij} - \sum_{j=1}^N \mu_j \sum_{i=1}^M \beta_{ij} b_{ij} \right\} \quad (23)$$

Como se detalla en [1], esto significa que la solución b_{ij}^* es también la solución de:

$$\max_{ij} \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{n_j} u_{ij} b_{ij} \right) \quad (24)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^M \alpha_{ij} b_{ij} \leq \sum_{i=1}^M \alpha_{ij} b_{ij}^* \quad j = 1, \dots, N \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^M \beta_{ij} b_{ij} \leq \sum_{i=1}^M \beta_{ij} b_{ij}^* \quad j = 1, \dots, N \quad (26)$$

De acuerdo al Teorema de Multiplicadores de Lagrange, el problema de optimización sin restricciones (23) es también la solución al problema de optimización con restricciones (24), que es nuestro problema de asignación de recursos, sólo que las restricciones de transporte y radio de (19) y (20) han sido sustituidas por $\sum_{i=1}^M \alpha_{ij} b_{ij}^*$ y $\sum_{i=1}^M \beta_{ij} b_{ij}^*$. Si conocen los valores de los multiplicadores, el problema de la expresión (23)

puede ser escrito como:

$$\max_{b_{ij}} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (u_{ij} - \lambda_j \alpha_{ij} - \mu_j \beta_{ij}) b_{ij} \right\} \quad (27)$$

Que a su vez implica que las soluciones son:

$$b_{ij}^* \begin{cases} 1 & \text{if } w_{ij} = u_{ij} - \lambda_j \alpha_{ij} - \mu_j \beta_{ij} > 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (28)$$

En donde el término w_{ij} se define como la *utilidad ponderada*, una métrica asociada a cada asignación que incorpora la utilidad, costes radio y transporte, así como el valor del multiplicador de la restricción radio/transporte de la estación base. Por lo tanto, el único paso a realizar para resolver el problema asignación de base consiste en calcular los valores de los multiplicadores de Lagrange.

En este trabajo se ha utilizado el algoritmo heurístico desarrollado en [1] para la resolución del problema de asignación, que se muestra en la Figura 8 y que consta de cuatro fases: Inicialización, Descarte, Agregación y Relajación. En la fase de inicialización se realiza el cálculo de los parámetros de entrada del algoritmo y la conformación de la matriz de asignación inicial. Asimismo, en esta fase se calculan los valores de utilidad y coste de recursos radio/transporte para cada combinación de usuario-estación base. Posteriormente, en la fase de Descarte se ajusta la asignación inicial mediante un procedimiento de reasignación de usuarios basado en la utilidad ponderada. Esto se realiza hasta que el algoritmo encuentra una asignación de usuarios que satisface las restricciones de capacidad de las estaciones base. Por su parte, la fase de Agregación tiene por objeto reasignar los usuarios que puedan obtener una utilidad mayor en otra estación base sin que se excedan las restricciones de capacidad en la nueva estación base. Finalmente, en la fase de Relajación del algoritmo se asignan los usuarios contenidos en la estación base nula, para así obtener la solución al problema de asignación de estación base.

4.2.3.1 Descripción del algoritmo

Este apartado describe el algoritmo heurístico utilizado para resolver el problema de asignación de base, del cual se muestra su diagrama de flujo en la Figura 8.

Fase de Inicialización

Inicialmente a cada usuario se le asigna la EB que proporciona una mayor utilidad creando una matriz de asignación, se calculan las restricciones de recursos incumplidos, y en la fase de Descarte se ajusta la matriz B_{ij} hasta que se cumplan las limitaciones. En el paso 0.1 de esta fase se inicializan a cero los multiplicadores de Lagrange. Posteriormente, en el paso 0.2 se realiza el cálculo de los costes radio y transporte, así como la utilidad de cada usuario i respecto cada estación base j .

$$\lambda_k = 0; \quad \mu_k = 0; \quad (29)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_j}; \quad \beta_{ij} = \frac{R_i}{C_j}; \quad u_{ij} = \frac{1}{\alpha_{ij}} \quad (30)$$

El paso 0.3 comprende la conformación de la matriz de asignación inicial, la cual se forma asignando

cada usuario a la estación base con la que se obtiene la mayor utilidad. Nótese que en este punto la utilidad de cada usuario y la utilidad ponderada son idénticas en este punto debido a que los multiplicadores tienen un valor igual a cero. Finalmente, en el paso 0.4 se calculan los costes totales de los recursos radio y transporte requeridos en cada estación base.

$$j(i) = \arg \max \{u_{ij}\} \rightarrow b_{ij} = 1 \quad (31)$$

$$\pi_j = \sum_{i=1}^M \alpha_{ij} b_{ij}; \quad \tau_j = \sum_{i=1}^M \beta_{ij} b_{ij}; \quad \psi_j = \{\pi_1, \dots, \pi_j, \tau_1, \dots, \tau_j\} \quad (32)$$

Fase de Descarte

La fase de Descarte se ejecuta en caso de que la suma de costes radio y/o transporte de los usuarios asignados en alguna estación base sea mayor al límite de recursos en la interfaz radio y/o transporte. El objetivo de esta fase es ajustar las asignaciones de los usuarios hasta que se satisfagan las restricciones de capacidad en cada estación base. En el primer paso 1.1 de esta fase se determina la estación base EB j^* cuya restricción (radio o transporte) haya sido la que más incumple la restricción de recursos. Posteriormente, para reducir los costes totales de recursos en la EB j^* es necesario reasignar usuarios hacia otras estaciones base.

Antes de explicar el procedimiento de reasignación utilizado en esta fase, es preciso hacer énfasis en que el papel que desempeñan los multiplicadores de Lagrange en la utilidad ponderada, consiste en reflejar el estado de ocupación del transporte e interfaz radio de cada estación base. Nótese que de acuerdo a (28), un usuario sólo puede ser asignado hacia aquellas estaciones base que produzcan una utilidad ponderada superior a cero. En definitiva, el criterio de asignación se basa en elegir para cada usuario la estación base con la que se consigue la máxima utilidad ponderada.

Para que pueda producirse la reasignación de un usuario de EB j^* hacia EB j , la utilidad ponderada en la nueva estación base debe ser superior a la obtenida en EB j^* . En particular, la reasignación se efectúa mediante el ajuste del valor del multiplicador de Lagrange asociado a la restricción más incumplida de EB j^* , ya que ello conduce a una reducción de la utilidad ponderada de los usuarios asignados a EB j^* . De manera que, si la restricción más incumplida ha sido el transporte de EB j^* , se deberá encontrar el valor del incremento Δ del multiplicador de transporte μ_{j^*} necesario para que el usuario i obtenga la máxima utilidad ponderada en EB j y que por tanto sea asignado a ésta. Al aplicar el incremento del multiplicador de transporte $\Delta\mu_{j^*,ij}$ se cumple la expresión:

$$\left(u_{ij^*} - \lambda_{j^*}\alpha_{ij^*} - (\mu_{j^*} + \Delta\mu_{j^*,ij})\beta_{ij^*}\right) \leq \left(u_{ij} - \lambda_j\alpha_{ij} - \mu_j\beta_{ij}\right) \quad (33)$$

Por lo que,

$$\Delta\mu_{j^*,ij} = \frac{u_{ij^*} - u_{ij} - \lambda_{j^*}\alpha_{ij^*} + \lambda_j\alpha_{ij} - \mu_{j^*}\beta_{ij^*} + \mu_j\beta_{ij}}{\beta_{ij^*}} \quad (34)$$

De manera similar, si la restricción más incumplida se ha presentado en la interfaz radio de EB j^* , el correspondiente incremento al multiplicador estará dado por:

$$\Delta\lambda_{j^*,ij} = \frac{u_{ij^*} - u_{ij} - \lambda_{j^*}\alpha_{ij^*} + \lambda_j\alpha_{ij} - \mu_{j^*}\beta_{ij^*} + \mu_j\beta_{ij}}{\alpha_{ij^*}} \quad (35)$$

Donde,

$$j^* = \arg \max_j \{\psi_j\} \quad (36)$$

Una vez calculado el incremento del multiplicador debe actualizarse el multiplicador de Lagrange asociado al requerimiento que más se haya incumplido. Posteriormente se actualiza el valor del multiplicador con el valor calculado de la media entre el primero y el segundo menor incremento, para así evitar un posible bucle en el algoritmo causado por tener un usuario con la misma utilidad ponderada respecto 2 estaciones base distintas.

$$\lambda_{j^*} = \lambda_{j^*} + \frac{\Delta\lambda_{I^*J^*} + \Delta\lambda_{I'J'}}{2}, I^*J^* = \arg \min_{ij} \{\Delta\lambda_{j^*,ij}\}, I'J' = \arg \min_{ij} \{\Delta\lambda_{j',ij}\}, I^* \neq I', J^* = J' \quad (37)$$

$$\mu_{j^*} = \mu_{j^*} + \frac{\Delta\mu_{I^*J^*} + \Delta\mu_{I'J'}}{2}, I^*J^* = \arg \min_{ij} \{\Delta\mu_{j^*,ij}\}, I'J' = \arg \min_{ij} \{\Delta\mu_{j',ij}\}, I^* \neq I', J^* \neq J' \quad (38)$$

Finalmente, en la fase de Descarte se actualizan los costes radio y transporte de cada estación base. En la siguiente iteración del algoritmo se comprobará si aún existe alguna estación base que incumpla las restricciones de capacidad, y en caso afirmativo se repetiría el procedimiento de reasignación descrito. Este proceso se ejecuta mientras existe alguna EB que exceda las restricciones de capacidad o radio.

Fase de Agregación

Después de la ejecución de la fase de Descarte, la matriz de asignación resultante satisface las restricciones de capacidad de los recursos radio y transporte de las estaciones base. No obstante, es posible que alguna estación base pueda disponer de recursos radio y transporte. Por lo tanto en la Fase de Agregación se comprueba si el remanente de capacidad puede ser utilizado para mejorar la asignación actual de los usuarios que puedan obtener una mejor utilidad en otra estación base, sin que ello implique exceder las restricciones de capacidad de la nueva estación base.

El incremento de utilidad se calcula para cada usuario en el paso 2.1 mediante la siguiente expresión:

$$\Delta u_{ij} \begin{cases} u_{ik} - u_{ij}, & \text{si } u_{ik} - u_{ij} > 0, \quad \pi_j + \alpha_{ik} \leq 1, \quad \tau_j + \beta_{ik} \leq 1 \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (39)$$

$$I'J' = \arg \max \{\Delta u_{ij}\}; b_{I'i(I')} = 0, b_{I'J'} = 1 \quad (40)$$

Donde

- u_{ij} : utilidad del usuario i en EB j (asignación actual).
- u_{ik} : utilidad del usuario i en EB k (estación base candidata).
- α_{ik} y β_{ik} : el coste radio y transporte del usuario i respecto EB k , respectivamente.
- π_k y τ_k : el coste total de los recursos radio y transporte en la EB candidata, respectivamente.

Se verifica si existen incrementos de utilidad positivos, y en ese caso se reasigna el usuario que produzca el mayor incremento de utilidad. Seguidamente se actualiza la matriz de asignación así como el coste total de recursos radio y transporte por estación base. Este proceso se repite hasta que ya no sea posible intercambiar usuarios hacia otras bases sin exceder las restricciones de capacidad.

Fase de Relajación

Debido a que el coste de los recursos radio han sido calculados a partir de la suposición de que el sistema esta totalmente cargado, es necesario realizar el cálculo de los valores reales de interferencia co-canal considerando la matriz de asignación resultante. Sin embargo, debido a que en las fases previas algunos usuarios pudieron haber sido asignados a la base nula es necesario que antes se realice un procedimiento de repesca: para cada usuario que se encuentra asignado a la estación base nula se determina la estación base (de su *active set*, excluyendo la base nula) respecto la que cada usuario obtiene la máxima utilidad ponderada.

$$w_{ij} = u_{ij} - \lambda_j \alpha_{ij} - \mu_j \beta_{ij}; ij = \arg \max \{w_{ij}\}; b_{ij^v} = 0, b_{ij} = 1 \quad (41)$$

Fin

Una vez finaliza el algoritmo el resultado obtenido es una matriz de asignación B . Es entonces cuando se calculan las potencias reales necesarias para cada uno de los usuarios, los costes y determinar el número de usuarios factibles en el sistema. Para determinar el grado de satisfacción se considerarán usuarios factibles todos aquellos que se encuentren en una celda que cumpla las restricciones existentes de capacidad radio y de transporte.

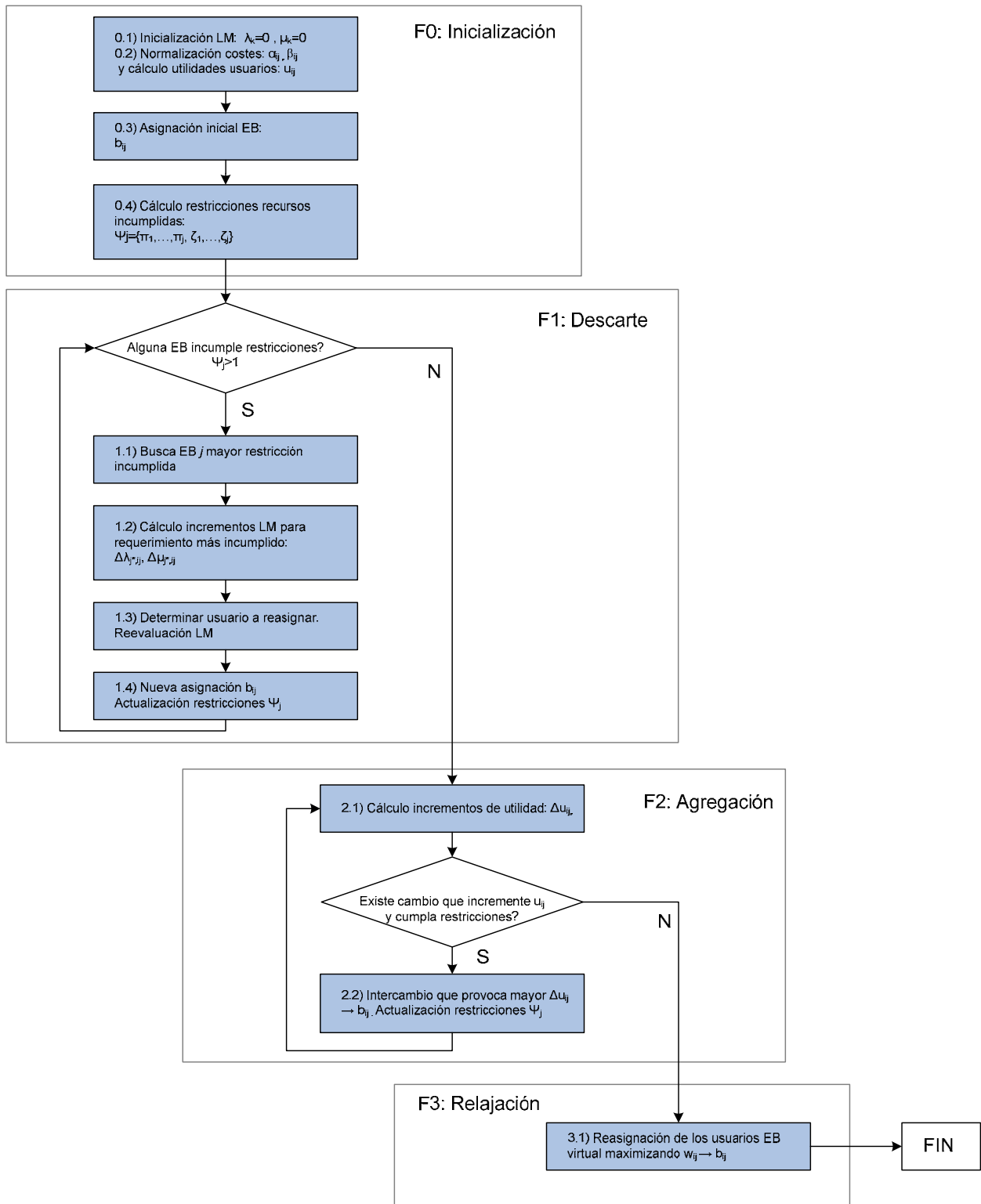


Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo de asignación de base basado en costes

4.2.4 Complejidad Computacional

En este apartado se aborda el análisis de complejidad del algoritmo de asignación de base detallado en la sección anterior.. En la Tabla 5 se presenta un resumen de la complejidad computacional de cada una de las diferentes partes que compone el algoritmo de asignación basado en coste de recursos.

La notación usada es la misma que para el caso del algoritmo basado en SA (4.1.4):

- M : número de usuarios en el sistema
- N_A : número de estaciones base en el *active set* ($N_A=7$)
- N : número total de estaciones base del sistema ($N=20$ ya que se considera la EB virtual)
- C : constante

En la fase de Inicialización del algoritmo (fase 0), la complejidad se compone por la inicialización de los multiplicadores de Lagrange $O(2N)$, la normalización de costes y el cálculo U_{ij} $O(M.N_A(N-1))$, la asignación de la B_{ij} inicial $O(M.N_A)$, y el cálculo de las restricciones incumplidas $O(C)$. En la fase de Descarte se debe buscar el requerimiento más incumplido $O(C)$, calcular el incremento de los ML para el requerimiento más incumplido $O(M.N_A)$, determinar el usuario a reasignar $O(C)$, reevaluar los ML y realizar una nueva asignación B_{ij} y actualizar las restricciones $O(C)$. El bucle de esta fase se realiza hasta que a cada usuario se le ha asignado una estación base y se cumplen todas las restricciones, por lo que en el peor caso se ejecuta $M.N_A$ veces. Por lo tanto el orden de complejidad para la ejecución de la fase Descarte es de $O(M^2.N_A^2)$.

En la fase de Agregación cada EB del AS de cada usuario i se chequea con la EB asignada al usuario, de manera que si resulta más valiosa la asignación sin infringir las restricciones, se cambia. El cálculo computacional necesario se compone del cálculo de los incrementos de utilidad $O(M.N_A)$ y otros procesos que únicamente requieren $O(C)$. Se ejecuta mientras no sean posibles más cambios, por lo que el número máximo de veces que se ejecuta es de $M.N_A$ veces, y la complejidad total para esta fase es de $O(M^2.N_A^2)$. Finalmente en la fase de Relajación, la reasignación de usuarios aporta una complejidad de $O(M.N_A) + O(C)$.

Fase	Paso	Complejidad
INICALIZACIÓN	0.1 Inicialización de multiplicadores de Lagrange	$O(2N)$
	0.2 Normalización de costes, cálculo de utilidades	$O(M.N_A.(N-1))$
	0.3 Construcción de la matriz de asignación inicial	$O(M)$
	0.4 Cálculo de costes de transporte	$O(M.N_A)$
	0.4 Cálculo de los costes totales por estación base	$O(2N)$
DESCARTE	1.1 Determinación de la restricción que más se incumple	$O(C)$
	1.2 Cálculo del incremento del multiplicador para la restricción más incumplida	$O(M.N_A)$
	1.3 Selección del usuario a reasignar	$O(C)$

	1.4 Actualización de la matriz de asignación y reajuste de los valores de los multiplicadores	$O(M.N_A)$
AGREGACIÓN	2.1 Cálculo de los incrementos de utilidad	$O(M.N_A)$
	2.2 Intercambio mejor	$O(C)$
	2.2 Actualización de restricciones	$O(C)$
	2.2 Reasignación de usuarios	$O(M.N_A) + O(C)$

Tabla 5. Cálculo complejidad computacional del algoritmo basado en costes

Por lo tanto, podemos concluir que el algoritmo presentado tiene una complejidad computacional total de $O(M^2.N_A^2)$.

$$O(M.N_A.N) + O(M^2.N_A^2) + O(M^2.N_A^2) + O(M.N_A) \square O(M^2.N_A^2) \quad (42)$$

4.3 Resumen

En este capítulo se han desarrollado dos diferentes algoritmos para resolver el problema de asignación de base considerando tanto los aspectos radio como las limitaciones de capacidad en el transporte del *backhaul*. El primero de los algoritmos descritos emplea la técnica de Simulated Annealing para realizar la búsqueda de una solución factible al problema de asignación. Por otra parte, el segundo algoritmo desarrollado utiliza el concepto de coste de recursos para modelar el consumo de recursos de cada asignación de usuario. A diferencia del planteamiento realizado en el algoritmo de SA, el segundo algoritmo se basa en el uso de los multiplicadores de Lagrange y el cálculo del consumo de recursos radio se realiza bajo la suposición de que el sistema se encuentra totalmente cargado. Dicha suposición permite que el cálculo de consumo de recursos radio de cada asignación no dependa de la asignación del resto de usuarios en el sistema, con lo es posible reducir la complejidad del problema de asignación de base.

De ambos algoritmos se ha realizado un análisis de la complejidad de los algoritmos para estimar la cantidad de pasos que requeriría cada algoritmo para encontrar una solución al problema de asignación de base. En particular, para ciertas condiciones de usuarios en el sistema se ha estimado el orden de complejidad de cada algoritmo. Para poder observar la diferencia entre la complejidad computacional de cada uno de los dos algoritmos desarrollados se ha calculado el coste computacional de cada uno considerando un número determinado de usuarios en el sistema. En particular, la complejidad se obtiene asumiendo $M=\{50, 150\}$ usuarios. En este sentido, a partir de las expresiones de complejidad obtenidas en los apartados 4.1.4 y 4.2.4, para el algoritmo basado en SA y el algoritmo basado en costes radio respectivamente, es posible determinar la complejidad computacional para el caso descrito.

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos considerando los siguientes parámetros:

- Basado en costes: $O(M^2.N_A^2)$ con $N_A=7$ y $M=n^\circ$ usuarios.
- Simulated Annealing: $O(K_T.K_{max}.q.M.N)$ con $N=19$, $q=80$, $M=n^\circ$ usuarios y los valores K_T, K_{max} variables en función de la calibración (apartado 4.1.3.1)

	Coste Computacional	
	50 usuarios	150 usuarios
O_{costes}	$122,5 \times 10^3$	$1,103 \times 10^6$
$O_{\text{SA_iteraciones_limitadas}}$	$3,591 \times 10^7$	$3,232 \times 10^8$
$O_{\text{SA_max_función_objetivo}}$	$1,277 \times 10^9$	$1,149 \times 10^{10}$

Tabla 6. Ejemplo de valores de coste computacional de los algoritmos planteados

5 Modelos y Herramientas de Simulación

El análisis de las prestaciones de las estrategias de asignación de base en sistemas WCDMA se ha llevado a cabo mediante simulación por ordenador. El presente capítulo está dedicado a la presentación y descripción de los modelos y herramientas utilizadas para llevar a cabo las simulaciones de este proyecto.

5.1 Plataforma de Simulación

5.1.1 Entorno celular

El entorno utilizado para las simulaciones consiste en un sistema macrocelular urbano compuesto por 19 celdas de radio 1 Km distribuidas en una estructura formada por una celda central y dos coronas tal y como se ilustra en la Figura 9. Las estaciones base se consideran ubicadas en el centro de las celdas, y cada una de ellas tiene un sistema radiante omnidireccional. Para evitar los efectos de los bordes en las celdas exteriores se ha empleado la técnica de *wrap-around*, la cual permite que las celdas exteriores cuenten con condiciones de interferencia similares a las del resto de celdas en el escenario.

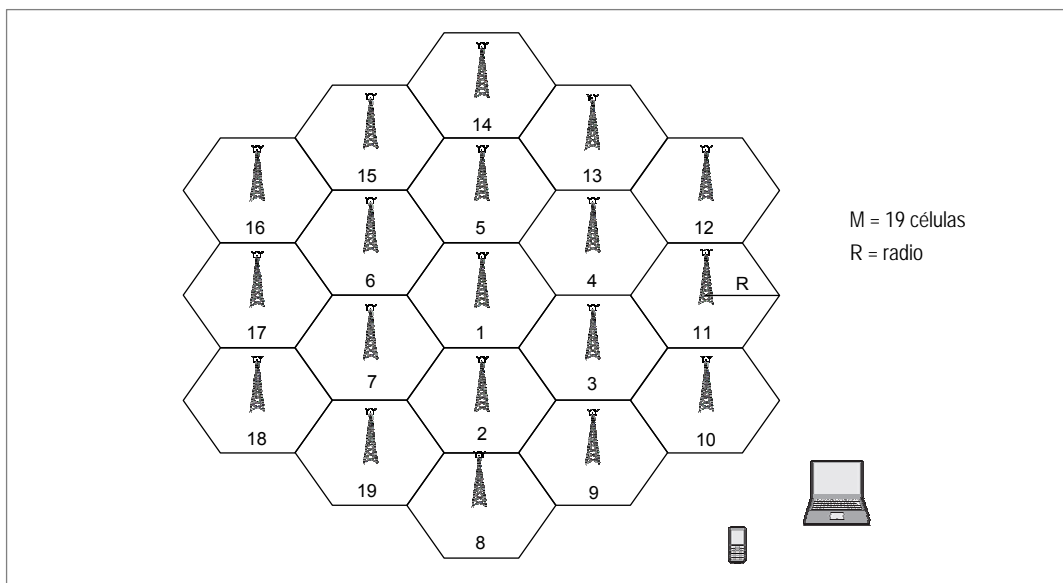


Figura 9. Escenario celular compuesto por 19 celdas hexagonales

5.1.2 Enlace radio

5.1.2.1 Potencia de usuario

Se analizan por separado los dos enlaces de la comunicación. En el enlace descendente el valor típico de potencia disponible es de 43 dBm (20W) para las macro células. Aproximadamente el 10% de la potencia se asigna a los canales piloto y de control, y el resto se asigna a cada uno de los canales de control en función de distintas variables como la tasa de transmisión R_b deseada, localización del usuario, carga de la celda, etc.

Para el enlace ascendente se han considerado terminales de clase 4 [6], que disponen de una potencia máxima de transmisión de 21 dBm (125 mW). Se escoge este tipo de terminales móviles ya que son los más restrictivos, aunque actualmente las tarjetas módems o módems USB para ordenadores portátiles son de clase 3 (24 dBm).

Para cada uno de los usuarios que sitúan en el escenario se establecen las condiciones para un enlace radio y se calcula la potencia de usuario en los enlaces ascendente y descendente a partir de las expresiones indicadas en el apartado 3.3.

Potencia en el enlace descendente

El cálculo de la potencia de un usuario no es independiente del resto de usuarios en el sistema ni de su asignación de estación base, por lo que requiere un cálculo iterativo. El pseudo-código para dicho cálculo se muestra en la Tabla 7 .

```

while no se alcanza un número máximo de iteraciones o se sale del bucle
  for {i=1...M}
    Inicialización I=0
    
$$I = \sum_{k=1, k \neq j}^N \frac{L_{ij}}{L_{ik}} P_k$$

    Cálculo de  $P_{ij}$ 
  end for
  La potencia requerida en la EB para servir a sus usuarios asignados:  $P_{EBj} = \sum_i P_{ij}$ 

  if  $P_{EBj} > P_{\max EB}$  then
    user_satisfaction=0
     $P_{EBj} = P_{\max EB}$ 
  else
    user_satisfaction=1
  end if
  Cálculo de la diferencia entre la potencia obtenida y la acumulada para cada EB
  if  $P_{BS} - P_{acum} \leq 0.001$  para toda EB then
    exit
  else
     $P_{acum} = P_{BS}$ 
  end if
end while

```

Tabla 7. Pseudo-código para el cálculo de potencia

Se calcula la potencia a partir de la interferencia intercelda para el usuario i respecto a la estación base j . El resto de estaciones base del sistema interfieren sobre el usuario, por lo que la potencia depende a su vez de la potencia de transmisión de cada una de las EB y del *pathloss* con el usuario i . En cada iteración se incrementa la potencia requerida en función de la interferencia intercelda, por lo que cada vez será mayor la potencia y con ella, la interferencia. El bucle finaliza cuando la diferencia entre la potencia entre dos iteraciones es menor de un 0.001 para todas las estaciones base.

Potencia en el enlace ascendente

El cálculo de la potencia requerida por el terminal móvil para transmitir en el enlace ascendente a la estación base que tiene asignada, también requiere un cálculo iterativo. La expresión usada para su cálculo se indica en el apartado 3.4.2 y se calcula de modo análogo al caso de la potencia en enlace descendente del subapartado anterior.

Se determinan las potencias iniciales de transmisión de cada uno de los usuarios para una cierta asignación $B=\{b_{ij}\}$ y se recalculan las potencias a partir del cálculo de la interferencia del resto de usuarios sobre cada uno de ellos. Se comprueba que la potencia de usuario no supere el máximo disponible en UL. Análogamente que en el caso de la potencia en el enlace descendente, el cálculo iterativo finaliza cuando converge el algoritmo, y que equivale a una diferencia de la potencia recalculada inferior a 0,001 para todos los usuarios.

5.1.2.2 Pérdidas de propagación

Para cada matriz de asignación entre los usuarios y las estaciones base del sistema $B=\{b_{ij}\}$ se ejecuta el cálculo del *pathloss* (pérdida de propagación) entre cada uno de los usuarios con cada una de las EB. Se calcula a partir la expresión presentada en el apartado 3.4.3 y, dado que se modela un entorno urbano denso, se toma una desviación estándar de 10 dB.

5.2 Parámetros de Simulación

Inicialmente el estudio se centra en dos velocidades de transmisión de bit en el enlace descendente, 128 Kbps y 384 Kbps, y una única tasa en el enlace ascendente de 64 Kbps. A partir de las consideraciones anteriores se han determinado los parámetros principales y constantes en las simulaciones realizadas., que se presentan en la Tabla 8.

Parámetro	Valor	
Tasa de velocidad de usuario en DL (R_{bDL})	128 Kbps	384 Kbps
Tasa de velocidad de usuario en UL (R_{bUL})	64 Kbps	64 Kbps
E_b/N_{oDL} umbral	5.3 dB	5.2 dB
E_b/N_{oUL} umbral	3.8 dB	3.8 dB
Capacidad $C_{air,p}$	1024 Kbps	1152 Kbps
Tasa de velocidad de chip W	3.84 Mchips/s	
Máx. potencia de transmisión disponible en la EB	43 dBm	
Máx. potencia de transmisión del terminal de clase A	21 dBm	
Ruido térmico P_N	-101.15 dBm	
Desviación típica de potencia de shadowing	10 dB	
Factor de ortogonalidad	0.5	
Ratio medio de interferencia propia en la celda, i	0.65	

Tabla 8. Parámetros de simulación

5.3 Metodología de Evaluación

Las estrategias de asignación de base se han evaluado considerando un análisis estático del sistema. Se efectúan un número determinado de realizaciones o *snapshots*, cada una de las cuales corresponde a una determinada distribución de usuarios en el sistema. En cada una de las realizaciones se distribuyen de manera uniforme M usuarios en el sistema, y posteriormente se realiza el cálculo de los diferentes parámetros que caracterizan el sistema celular (por ejemplo, las pérdidas de propagación, potencia transmisión en el enlace descendente, etc). Mediante la aplicación del algoritmo de asignación de base considerado se obtiene una solución al problema de asignación de base, y finalmente, para obtener resultados estadísticos válidos se realizan un número determinado de *snapshots* para cada uno de los casos considerados (es decir, considerando un número de usuario en el sistema).

5.4 Definición de Métricas de Evaluación

El principal parámetro para evaluar las estrategias de asignación de base es el número de usuarios admitidos por el sistema con una cierta probabilidad de bloqueo, que también se puede expresar como grado de satisfacción de los usuarios. En este sentido, después de que se obtiene la solución al problema de asignación de base (correspondiente a una determinada realización), se comprueba si se satisfacen las restricciones de radio y transporte en cada estación base. En particular, si el consumo de recursos radio/transporte excede la capacidad máxima disponible en la interfaz radio o en la red de transporte de una determinada estación base, se considera que todos los usuarios que se encuentren en dicha estación base son asignaciones no factibles puesto que la estación base no cuenta con suficientes recursos para servir a todos (cumpliendo el requisito de tasa de servicio). Por el contrario, si la solución de asignación no excede el máximo de recursos disponibles se considera entonces que todos los usuarios de esta estación base son factibles. De esta forma, para cada realización se obtiene un porcentaje de usuarios factibles en el enlace descendente, el cual se obtiene como el cociente del número de usuarios factibles entre el número de usuarios totales en el sistema.

6 Rendimiento de las Estrategias de Asignación de Base

En este capítulo se presentan y analizan las prestaciones de las estrategias de asignación de base descritas en el apartado 3.2. Dichas estrategias son: (1) asignación basada en la menor pérdida de propagación, (2) asignación basada en el consumo de potencia del enlace descendente de las bases, y (3) asignación basada en el consumo de potencia y capacidad de transporte de las bases. Antes de presentar los resultados de las prestaciones de las estrategias se describen los escenarios de simulación utilizados en el presente capítulo.

6.1 Definición de escenarios de evaluación

Los escenarios considerados en la evaluación de las estrategias de asignación de base se han clasificado de acuerdo al tipo de servicio de los usuarios, así como también en función de la capacidad de transporte en las estaciones base en el despliegue celular. De esta forma, los escenarios de simulación definidos son los siguientes:

- En el primer escenario se asume que todos los usuarios en el sistema tienen el mismo requerimiento de tasa de servicio (en adelante también denominado escenario monoservicio), y los resultados obtenidos se presentan en el apartado 6.3. Este escenario de simulación considera además dos variantes adicionales: (a) en la primera de éstas se asume que todas las estaciones base en el sistema disponen del mismo ancho de banda (capacidad de transporte) en el *backhaul*; y (b) se asume que las estaciones base tienen capacidad de transporte diferente.
- En el segundo escenario cada usuario en el sistema tiene diferente requerimiento de tasa de servicio (128 o 384 Kbps). Mediante este escenario multiservicio se desea evaluar el impacto de la tasa de servicio de los usuarios sobre la eficiencia de cada algoritmo de asignación de base. En este escenario se ha considerado que las estaciones base del sistema tienen una capacidad de transporte diferente, y se ha añadido el concepto de prioridad de usuario en función de la tasa de servicio requerida.

En cada uno de los escenarios se ha calculado la eficiencia de las distintas estrategias para poder contrastar y cuantificar el beneficio que aporta la estrategia *Backhaul-aware* y determinar en qué condiciones de red es adecuada. Se considera un porcentaje de bloqueo admisible del 5%, por lo que se marca como punto de trabajo un grado de satisfacción de los usuarios del 95% y se muestra para distintas capacidades de transporte en las estaciones base. Este porcentaje de satisfacción se obtiene a partir del cálculo del número de usuarios factibles en el enlace descendente respecto al número total de usuarios en el sistema.

6.2 Método de resolución

El rendimiento de las estrategias de asignación se evalúa a partir de los resultados obtenidos en los distintos escenarios planteados. En este apartado se detalla el algoritmo utilizado para la resolución del problema presentado, así como el método y la fiabilidad de los resultados.

6.2.1 Selección del algoritmo de resolución

En el capítulo 4 se plantearon dos diferentes tipos de algoritmo que permiten resolver el problema de asignación de base: Simulated Annealing y basado en costes. Ambos algoritmos se han utilizado para evaluar el rendimiento de la estrategia *Backhaul-aware* frente a las estrategias que consideran únicamente aspectos radio en el proceso de asignación. Ambos algoritmos han sido evaluados y presentados en [1], [2] y [3]. A fin de presentar resultados relativos a la estrategia de asignación *Backhaul-aware*, se ha seleccionado como método de resolución el algoritmo de basado en costes dado que a raíz de las pruebas realizadas presentaba diferentes ventajas respecto el algoritmo basado en Simulated Annealing en términos del tiempo de ejecución requerido para obtener resultados.

6.2.2 Fiabilidad de los resultados

Como se ha explicado anteriormente, para una determinada distribución de usuarios (*snapshot*) en el sistema celular, se utiliza cada uno de los algoritmos evaluados (*Backhaul-aware*, *Radio-based* y MPL) para obtener una solución al problema de asignación de base. Al finalizar la ejecución de cada algoritmo se obtienen diversas estadísticas para cada uno de los *snapshots* realizados. Por tanto, para valorar las prestaciones del algoritmo es necesario ejecutar distintos *snapshots* para así poder obtener resultados estadísticos fiables. La Figura 10 presenta el diagrama de bloques de la estructura de simulación utilizada para la obtención de resultados.

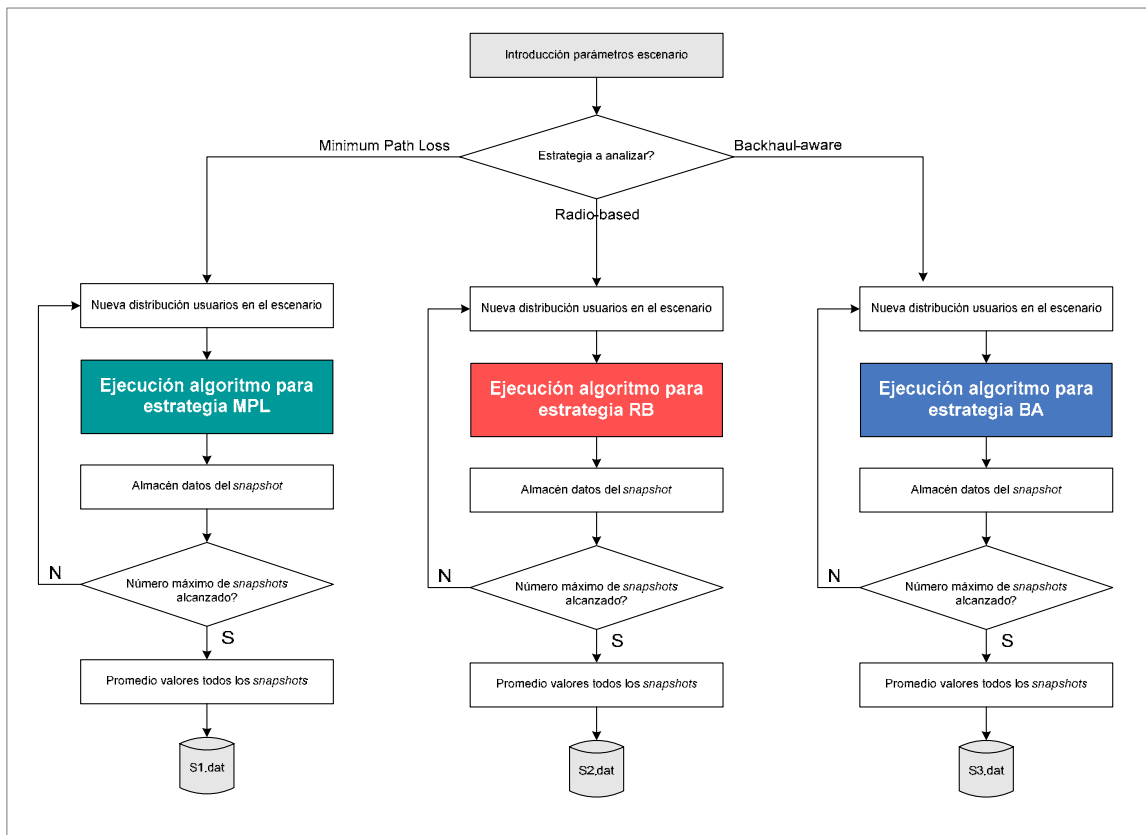


Figura 10. Diagrama de flujo de la obtención de resultados

Al finalizar la totalidad de las realizaciones (*snapshots*) se recolectan diversas estadísticas que permiten evaluar el rendimiento de los algoritmos de asignación. En particular, las estadísticas que se obtienen son las siguientes:

- Número de usuarios totales y factibles para cada tasa de servicio.
- Porcentaje de factibilidad en la realización.
- Potencia media y desviación de las estaciones base y de los terminales móviles.
- Ancho de banda requerido por las estaciones base.
- Costes radio y de transporte totales en cada una de las estaciones base.

En este contexto, para determinar el número de realizaciones necesarias para obtener resultados fiables se ha probado valores entre 100 y 3.000 realizaciones. Se debe tener en cuenta que cuanto mayor es el número de realizaciones, los resultados son calculados con más muestras y por lo tanto son más fiables. Sin embargo, debido a que ello también implicaría un incremento del tiempo de simulación, en esta sección se pretende encontrar un compromiso entre el número de realizaciones y fiabilidad obtenida.

Para ello nótese que se debe usar un número de realizaciones diferente en función del escenario de trabajo. Es debido a que si los usuarios solicitan una tasa de $R_b=384$ Kbps, el número de usuarios que se pueden acomodar en el sistema es pequeño. Por el contrario si R_b es menor, el número de usuarios es mayor y se necesitan más usuarios para poder congestionar la capacidad de transporte de la estación base. Cuanto menor es el número de usuarios, el resultado de cada una de las realizaciones depende en mayor manera de la distribución espacial concreta de esa realización. Es por este motivo que es necesario ejecutar un número más elevado de *snapshots* que para el caso de la tasa de transmisión $R_b=128$ Kbps.

Uno de los test para determinar dicho número consiste en simular un mismo escenario y obtener resultados con distintos número de realizaciones. Para ello, se ha escogido la estrategia *Backhaul-aware* y $\Phi=1.5$, y como métrica de evaluación se analizará el grado de satisfacción para un cierto número de usuarios. En la Tabla 9 y Tabla 10 se muestra el porcentaje de usuarios satisfechos para las dos tasas de transmisión con la que se trabajará, 384 Kbps y 128 Kbps respectivamente.

Número de usuarios	Número de realizaciones					
	100	200	500	1.000	2.000	3.000
25	100,0	99,8	99,9	99,9	99,9	99,9
30	99,2	99,7	99,8	99,8	99,7	99,7
35	99,1	99,5	99,3	99,3	99,3	99,4
40	98,1	98,2	98,4	98,4	98,4	98,5
45	96,0	96,9	96,7	96,6	96,4	96,6
50	92,2	92,4	92,7	92,6	92,5	92,6

Tabla 9. Porcentaje de usuarios satisfechos para $R_b=384$ Kbps

De acuerdo a la información de la Tabla 9, se puede concluir que a partir de 1.000 realizaciones, el porcentaje de usuarios satisfechos que se obtiene no cambia para los casos de 25 y 30 usuarios, mientras que para el resto la diferencia apreciada está en torno a 0,1% (la desviación estándar respecto a

3000 realizaciones inferior a 0,09). De forma análoga se ha calculado para el caso de una tasa de 128 Kbps. Se determina el número de realizaciones en 200, que permite una desviación máxima de 0,38 a respecto de 1000. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 10:

Número de usuarios	Número de realizaciones					
	20	50	100	200	500	1.000
140	100,0	100,0	100,0	99,8	99,8	99,9
145	100,0	99,9	99,8	99,8	99,7	99,8
150	100,0	99,2	99,3	99,6	99,4	99,3
155	99,7	99,2	98,8	98,4	98,9	98,8
160	99,3	96,3	95,8	97,2	96,9	96,7
165	89,8	93,3	93,4	93,0	93,3	93,6

Tabla 10. Porcentaje de usuarios satisfechos para $R_b=128$ Kbps

Como se podrá apreciar posteriormente en los capítulos 6.3 y 6.4, el número de realizaciones que se han seleccionado permiten obtener curvas completas con suficiente suavidad para evaluar las estrategias.

6.3 Escenarios Monoservicio

En este apartado se evalúan las estrategias de asignación de base en un escenario en el que se asume que todos los usuarios en el sistema cuentan el mismo requerimiento de tasa de servicio binaria.

6.3.1 Capacidad de transporte homogénea

En el escenario inicial de evaluación se ha considerado que la capacidad de transporte es igual en todas las EB del sistema, por lo que se dice que la capacidad de transporte en el sistema es homogénea. El primer parámetro a estudiar se centra en la evolución del porcentaje de satisfacción en función del número de usuarios en el sistema, es decir, la tasa de usuarios que pueden ser asignados de forma que no se excedan las capacidades disponibles en la interfaz radio (la potencia máxima) ni la red de transporte (ancho de banda máximo).

En este sentido, se han ejecutado distintas simulaciones para obtener en el número de usuarios activos que pueden ser asignados en un sistema con un grado de satisfacción entre el 100% y el 90%. Se ha realizado para usuarios con una tasa de servicio de 384 Kbps y para 128Kbps (en este caso se evalúa para un número de usuarios múltiples de 2), con distintas condiciones de limitaciones del ancho de banda disponible en las EB, que se modelan con $\Phi = \{1, 1.5, 2, 2.5\}$.

En la Figura 11 a la Figura 14 se muestra el comportamiento del grado de satisfacción de la red a medida que se incrementa el número de usuarios en el sistema. A mayor número de usuarios, éstos no pueden ser admitidos en su totalidad y disminuye el porcentaje de usuarios satisfechos. De las tres estrategias analizadas en este trabajo, se observa como MPL es la que obtiene menores prestaciones en términos de grado de satisfacción de usuarios, independientemente de los parámetros fijados.

En la Figura 11 se puede observar que, cuando la capacidad de transporte de las EB del sistema está limitada con un factor multiplicador $\Phi=1$ y $\Phi=1,5$, el comportamiento de las estrategias analizadas es

sustancialmente diferente. La estrategia propuesta *Backhaul-aware* permite acomodar un mayor número de usuarios en el sistema para un determinado grado de satisfacción, comparada con las estrategias MPL y RB. En el caso de un escenario monoservicio con $R_b=384$ Kbps y una limitación severa en la capacidad de transporte en las EB de $\Phi=1$, si se desea garantizar un 95% de satisfacción de los usuarios, la estrategia propuesta BA permite incrementar en un 90% el número de usuarios en el sistema respecto RB. Para $\Phi=1.5$, la mejora aportada por BA sobre RB, también para un 95% de satisfacción, es superior al 40% en número de usuarios.

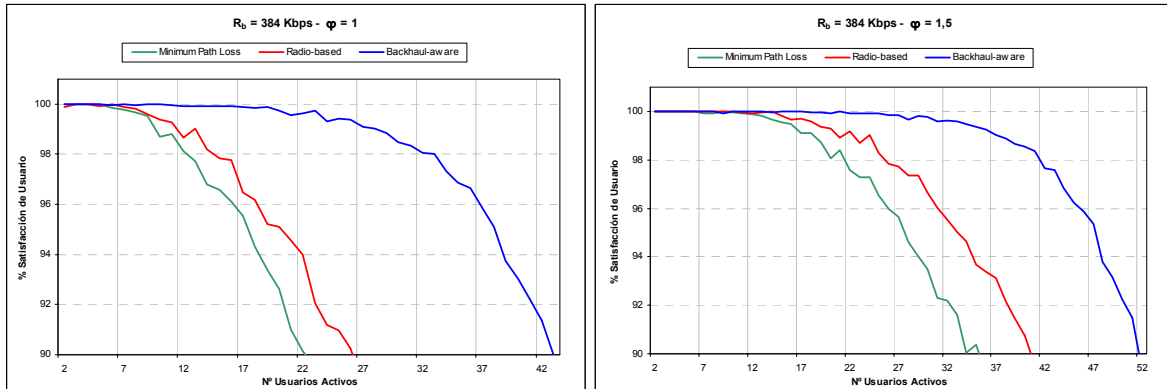


Figura 11. % Satisfacción de Usuarios para $R_b=384$ Kbps con $\Phi=1$ y 1.5

Se ha analizado el caso análogo, también monoservicio, pero con los usuarios en el sistema con una tasa binaria de 128 Kbps. Los resultados que se muestran en la Figura 12 son similares a los obtenidos en el caso de 384 Kbps. Cuando el factor que modela el extra de ancho de banda es de $\Phi=1$ la estrategia *Backhaul-aware* aporta un considerable aumento del número de usuarios respecto a las dos estrategias de referencia basadas únicamente en aspectos radio. Sin embargo, cuando $\Phi=1.5$ la mejora aportada se modera más que en el caso que $R_b=384$ Kbps. Para un 95% de grado de satisfacción de usuario, la diferencia en cuanto a número de usuarios activos en el sistema se aproxima entre las estrategias RB y BA.

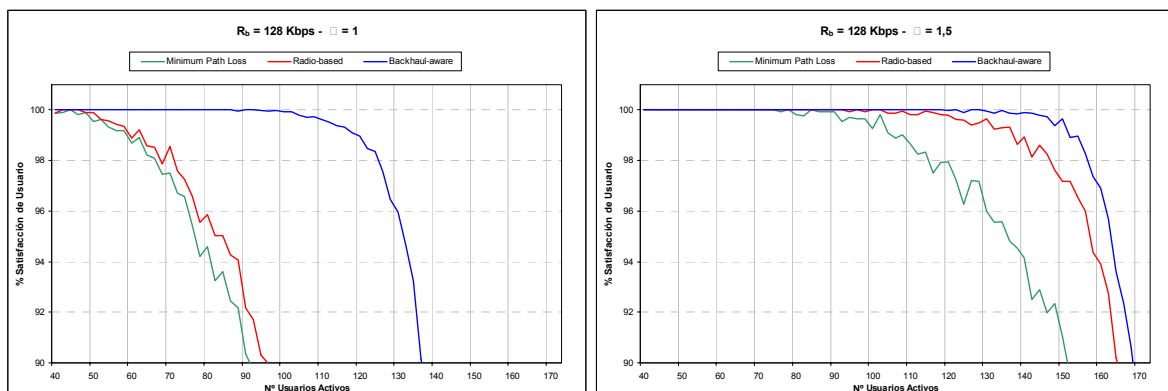


Figura 12. % Satisfacción de Usuarios para $R_b=128$ Kbps con $\Phi=1$ y 1.5

La Figura 13 y la Figura 14 muestran las curvas obtenidas para una capacidad de transporte equivalente a $\Phi=2$ y $\Phi=2.5$ para escenarios monoservicio con $R_b=384$ Kbps y $R_b=128$ Kbps. Se constata que si se fija

el valor de Φ por encima de 2, o lo que es equivalente, se incrementa el ancho de banda en las estaciones base del sistema y desaparecen las limitaciones de capacidad de transporte, las estrategias *Radio-based* y *Backhaul-aware* muestran un comportamiento similar y sus curvas convergen. Ambas estrategias proveen las mismas prestaciones debido a que en tal caso la red de transporte no constituye una limitación de capacidad y por tanto las asignaciones de usuarios se ven influenciadas principalmente por las limitaciones de capacidad en la interfaz radio.

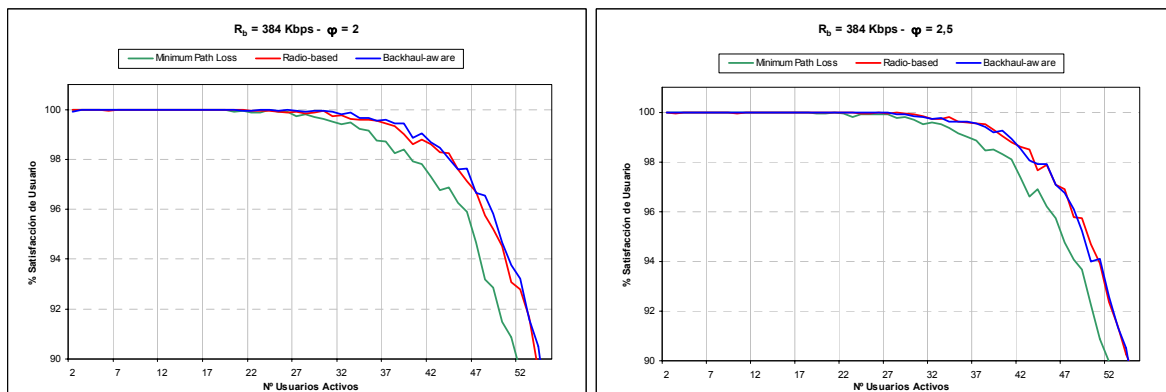


Figura 13. % Satisfacción de Usuarios para $R_b=384$ Kbps con $\Phi=2$ y 2.5

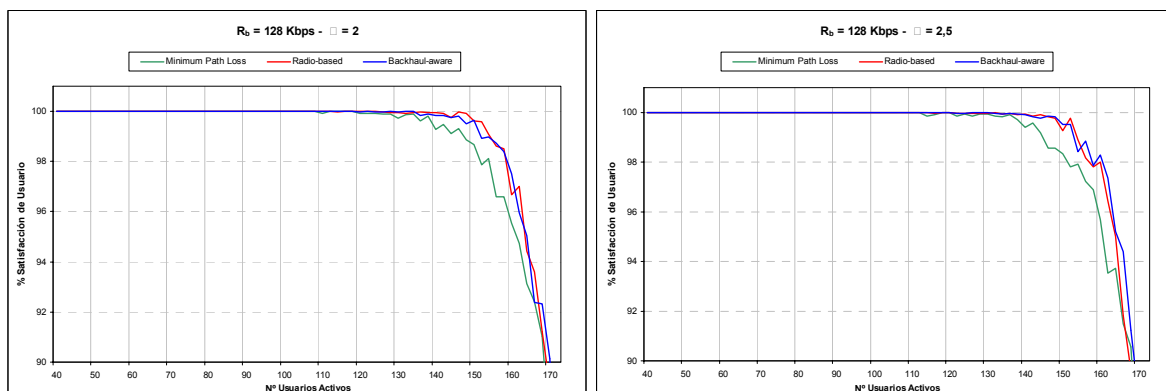


Figura 14. % Satisfacción de Usuarios para $R_b=128$ Kbps con $\Phi=2$ y 2.5

Todas las gráficas mostradas constatan como efectivamente la estrategia *Blackhaul-aware* permite incrementar número de usuarios activos en un sistema con restricciones de ancho de banda en sus EB. El beneficio proporcionado es dependiente de la limitación de la capacidad de transporte, resultado muy elevado para una limitación severa en el ancho de banda de las EB y convergiendo hacia la estrategia *Radio-based* a medida que aumenta la capacidad de transporte en las estaciones base (aumenta el valor de Φ). Nótese que para un grado de satisfacción del 95%, con $\Phi=1,5$ la estrategia *Blackhaul-aware* admite a la misma cantidad de usuarios que *Radio-based* con $\Phi=2$. De este modo se permite reducir los requerimientos de ancho de banda en las EB para ofrecer el mismo servicio.

Para comparar las estrategias analizadas se representa en la en la Figura 15 y la Figura 16 el número máximo de usuarios totales en el sistema para un porcentaje de satisfacción fijado en 95%.

En la Figura 15 se aprecia claramente que, en los escenarios con las EB del sistema muy limitadas en

capacidad de transporte, la estrategia propuesta BA permite ofrecer servicio a un mayor número de usuarios que para estrategias basadas únicamente en aspectos radio como MPL o RB. A medida que aumenta el ancho de banda, el beneficio de BA respecto RB disminuye hasta ser aproximadamente del 40% para 1,5 y un 9% para 1,75. De nuevo se observa como, a partir de valores iguales o superiores a $\Phi=2$ las curvas *Radio-based* y *Backhaul-aware* convergen; las estrategias se estabilizan ya que la capacidad de transporte ya no es el factor limitante y el sistema acepta un número de usuarios en total en función de la capacidad radio.

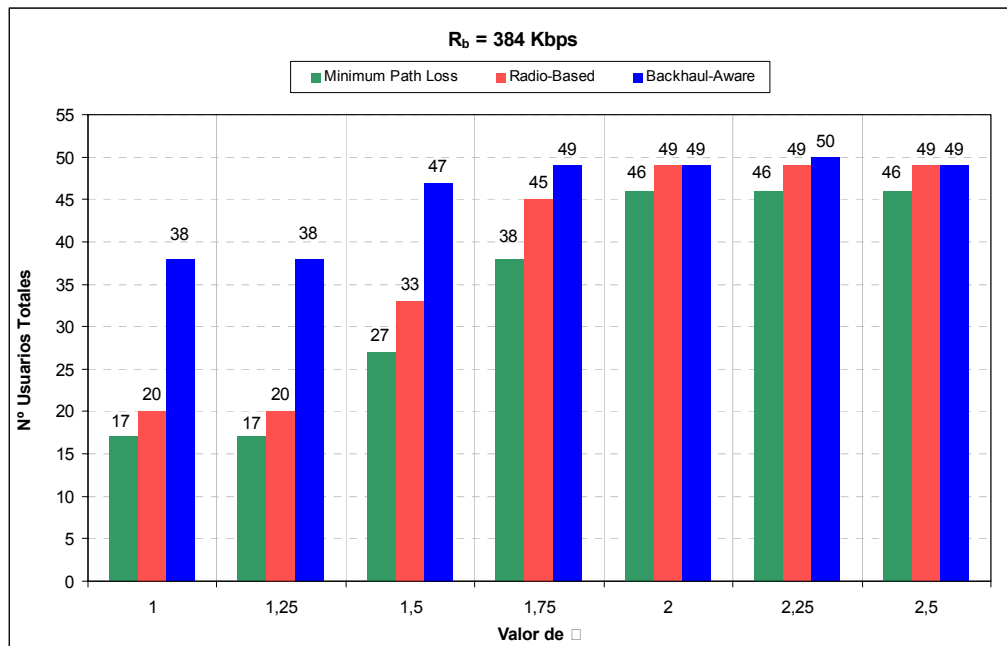


Figura 15. Número de usuarios para % Satisfacción del 95% vs. Φ , $R_b=384$ Kbps

A continuación, el escenario arriba descrito ha sido replicado pero ahora considerando una tasa de servicio de $R_b=128$ Kbps. En la Figura 16 se muestra el número de usuarios activos en el sistema que cada estrategia de asignación es capaz de soportar para garantizar un grado de satisfacción del 95% de los usuarios en el sistema. Análogamente que para el caso anterior de $R_b=384$ Kbps, para valores pequeños de Φ (escenarios limitados en ancho de banda) los beneficios en número de usuarios que aporta BA son sustanciales, y a medida que aumenta Φ las estrategias tienden a converger. Para $\Phi=1,25$ el beneficio de BA sobre RB es sobre un 25% más de usuarios y de un 5% para $\Phi=1,5$.

La estrategia propuesta *Backhaul-aware* es capaz de conseguir las prestaciones observadas debido a que las asignaciones de base se realizan de modo que la carga en la interfaz radio y en la red de transporte se balancea en función del volumen de tráfico. Esto conlleva que la solución de asignación resultante sea factible tanto desde el punto de vista de recursos radio como de transporte. Contrariamente, las estrategias de referencia MPL y RB, al no considerar las limitantes de capacidad en las EB, pueden conducir a soluciones en las que no se satisface la restricción de capacidad de las EB, convirtiendo la solución de asignación en no factible desde el punto de vista de transporte.

Cabe destacar que cuando se considera una menor tasa binaria, el porcentaje de beneficio aportado es

menor y la convergencia entre las estrategias se produce en escenarios menos limitados. Para el caso de tasas de servicio mayores, las ganancias de la estrategia BA de capacidad total del sistema son más significativas. Las estrategias de asignación de base de referencia no tienen en cuenta la capacidad de transporte de la EB, cuando los usuarios demandan tasas de servicio mayores el número de usuarios por celda es menor, por lo que los requerimientos cobran mayor relevancia.

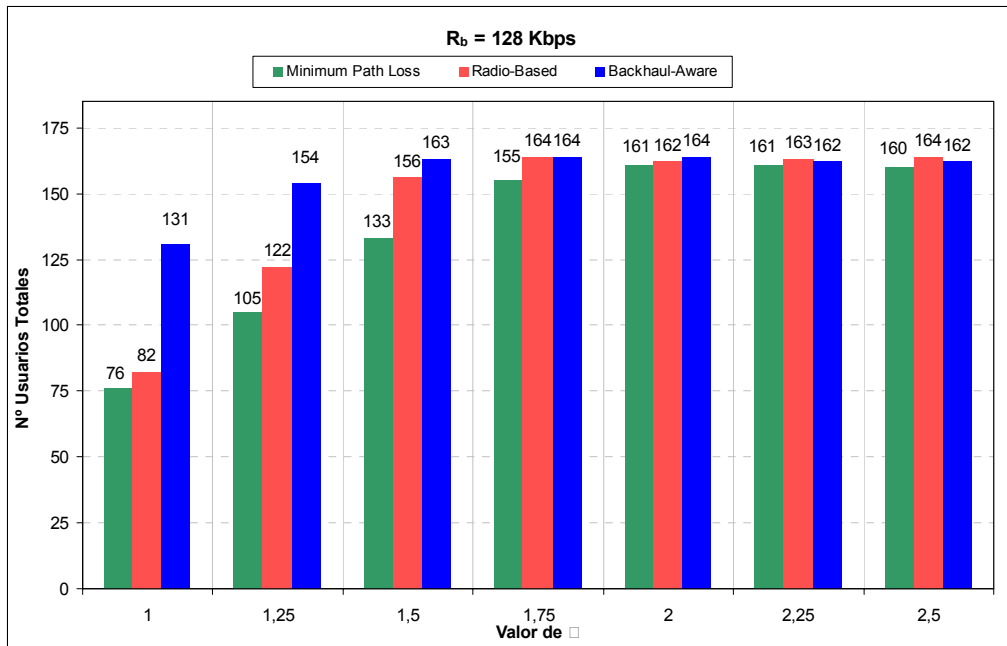


Figura 16. Número de usuarios para % Satisfacción del 95% vs. Φ , $R_b=128$ Kbps

6.3.1.1 Impacto en la potencia de las EB

La estrategia *Backhaul-aware* permite ofrecer servicio a un número mayor de usuarios, realizando asignaciones que no son la mejor opción desde el punto de vista de recursos radio. En este sentido, en este apartado se evalúa el impacto de la estrategia propuesta en el consumo de recursos radio (nivel de potencia de transmisión requerida en las estaciones base). La aplicación que se ha desarrollado almacena distintas métricas para evaluar las distintas estrategias analizadas. En cada uno de los *snapshots* ejecutados se almacena la potencia necesaria de cada una de las estaciones base del sistema para poder mantener las comunicaciones asignadas y se obtiene la potencia media que consumen las EB para una realización en concreto. Finalmente se realiza otro promedio entre todos los *snapshots* para obtener la potencia media de EB.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas de los promedios de la potencia media necesaria en las estaciones base (Figura 17 y Figura 18) y en los terminales móviles (Figura 19 y Figura 20) para un valor de $\Phi=1,5$. Nótese que las curvas de cada estrategia se toman para un grado de satisfacción de usuario entre el 100% y el 90%, por lo que cada curva finaliza cuando el número de usuarios en el sistema permite un 90% de satisfacción.

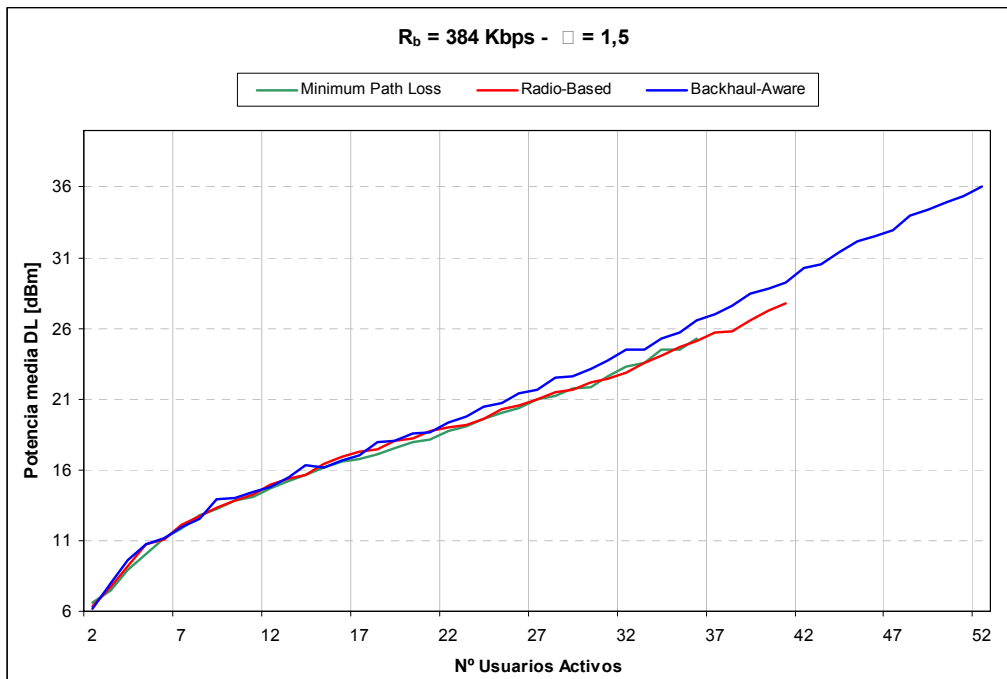


Figura 17. Potencia media EB vs. Número de usuarios, $R_b=384 \text{ Kbps}$, $\Phi=1.5$

En la evolución de la potencia media de transmisión de la EB en función del número de usuarios se observa que a partir de 22 usuarios la estrategia *Backhaul-aware* empieza a divergir respecto RB y MPL. A medida que se sitúan más usuarios en el escenario, el incremento de potencia se acentúa, hasta llegar a una diferencia de 1 dB para el caso que se alcanza un 95% usuarios satisfechos para *Radio-based* (es decir, 33 usuarios en el sistema). En la Tabla 12 se muestra el promedio de la potencia requerida en las estaciones base para un número determinado de usuarios en el sistema. Se han escogido como valores representativos el número de usuarios máximo para cada estrategia y un bloqueo del 5%.

nº usuarios	Potencia media estación base $P_{DL \text{ media}} \text{ [dBm]}$		
	Minimum Path Loss	Radio-based	Backhaul-aware
27	21,00 dBm	20,95 dBm	21,65 dBm
33	-	23,54 dBm	24,48 dBm
47	-	-	32,91 dBm

Tabla 11. Consumo medio de potencia en la EB, $R_b=384 \text{ Kbps}$, $\Phi=1.5$

Comparando las estrategias *Radio-based* y *Backhaul-aware* se observa el incremento de potencia que conlleva el uso de la estrategia propuesta, siendo del 24% para 33 usuarios en el sistema. Se analiza el mismo caso, pero esta vez para una tasa binaria de 128 Kbps, y se presentan los resultados obtenidos en la Figura 18.

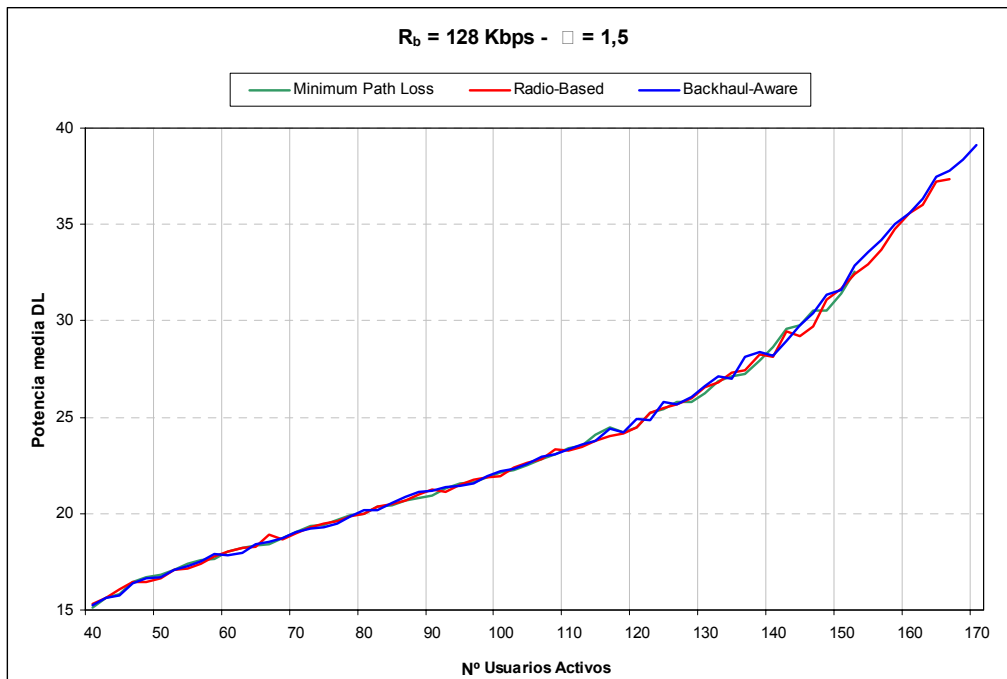


Figura 18. Potencia media EB vs. Número de usuarios, $R_b=128 \text{ Kbps}$, $\Phi=1.5$

Usuarios	Potencia media estación base $P_{DL \text{ media}} \text{ [dBm]}$		
	Minimum Path Loss	Radio-Based	Backhaul-Aware
133	26,9 dBm	26,6 dBm	26,8 dBm
156	-	33,7 dBm	34,2 dBm
163	-	-	37,0 dBm

Tabla 12. Consumo medio de potencia en la EB, $R_b=128 \text{ Kbps}$, $\Phi=1.5$

Fijémonos que para un sistema con 156 usuarios a 128Kbps, con *Radio-based* la satisfacción de usuario es del 95% mientras que para BA es del 98,2% a costa de un requisito del incremento de potencia en la estación base de un 13%. La estrategia *Backhaul-aware* permite modificar las asignaciones de EB realizadas acorde su coste radio para maximizar la utilidad total del sistema. Para buscar la solución óptima asignará usuarios a estaciones base con un coste menor de capacidad de transporte, pero penalizará la potencia total necesaria en la estación base. A medida que el sistema no tiene limitaciones en el *backhaul* y se encuentra al completo con su número máximo de usuarios para una cierta probabilidad de bloqueo (en este estudio un 5%), la estrategia *Backhaul-Aware* se comporta de forma similar a *Radio-based*, sin incrementos sustanciales de necesidad de potencia. Es debido a que la matriz de asignación realizada no dista de la que se obtendría con la estrategia RB.

6.3.1.2 Impacto en la potencia de los terminales

Se han detallado el beneficio que aporta el algoritmo propuesto en número de usuarios activos en el sistema, representando una importante mejora en el caso de disponer de limitaciones de transporte, así como sus implicaciones en la potencia de transmisión necesaria en las estaciones base. Aunque el

enlace limitante es el descendente, se debe tener en cuenta que la potencia en los terminales está más limitada y no puede ser ampliada como en las EB. En este apartado se cuantifica el impacto en el enlace ascendente

En la Figura 19 se presenta el resultado obtenido de la potencia media en el enlace ascendente para un escenario monoservicio con $R_b=384$ Kbps y una limitación del ancho de banda de las estaciones base de $\Phi=1,5$. Las curvas se finalizan para el número de usuarios en el sistema que aporta un grado de satisfacción del 95%. Como también se constata en los valores que se indican en la Tabla 13, la estrategia propuesta BA comporta un mayor requerimiento de potencia de transmisión de los usuarios.

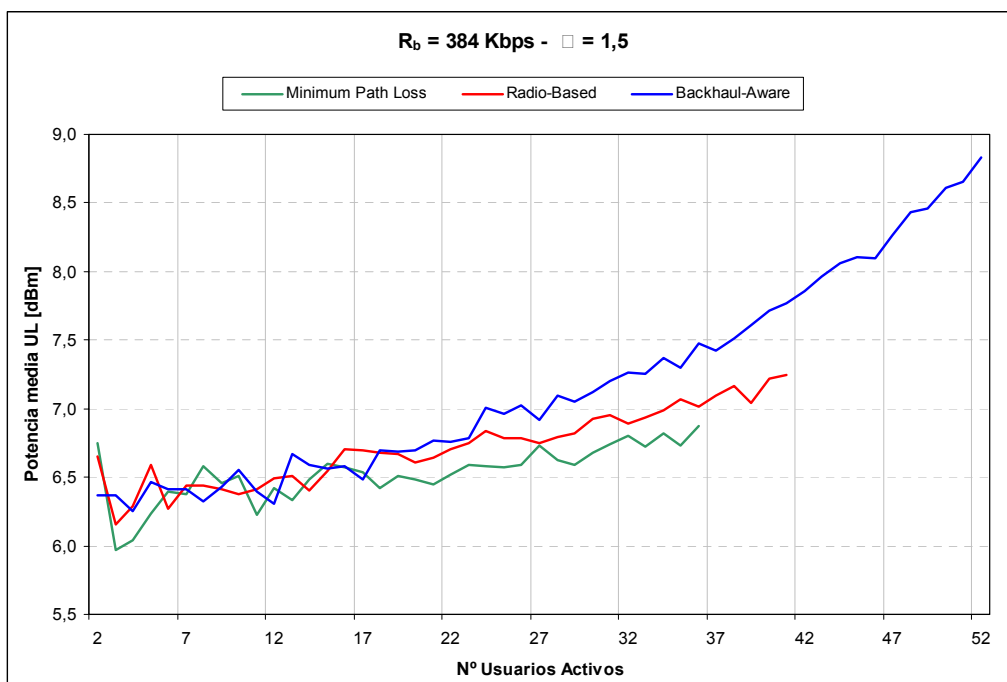


Figura 19. Potencia media TM vs. Número de usuarios, $R_b=384$ Kbps, $\Phi=1.5$

Usuarios	Potencia media terminal móvil $P_{UL\ media}$ [dBm]		
	Minimum Path Loss	Radio-Based	Backhaul-Aware
27	6,7 dBm	6,7 dBm	6,9 dBm
33	-	6,9 dBm	7,3 dBm
47	-	-	8,3 dBm

Tabla 13. Consumo medio de potencia MT para cada estrategia, $R_b=384$ Kbps, $\Phi=1.5$

Del mismo modo se ha replicado el escenario presentado para una tasa binaria de 128 Kbps. Los resultados obtenidos presentan la misma tendencia y se detallan en la Figura 20 y la Tabla 14.

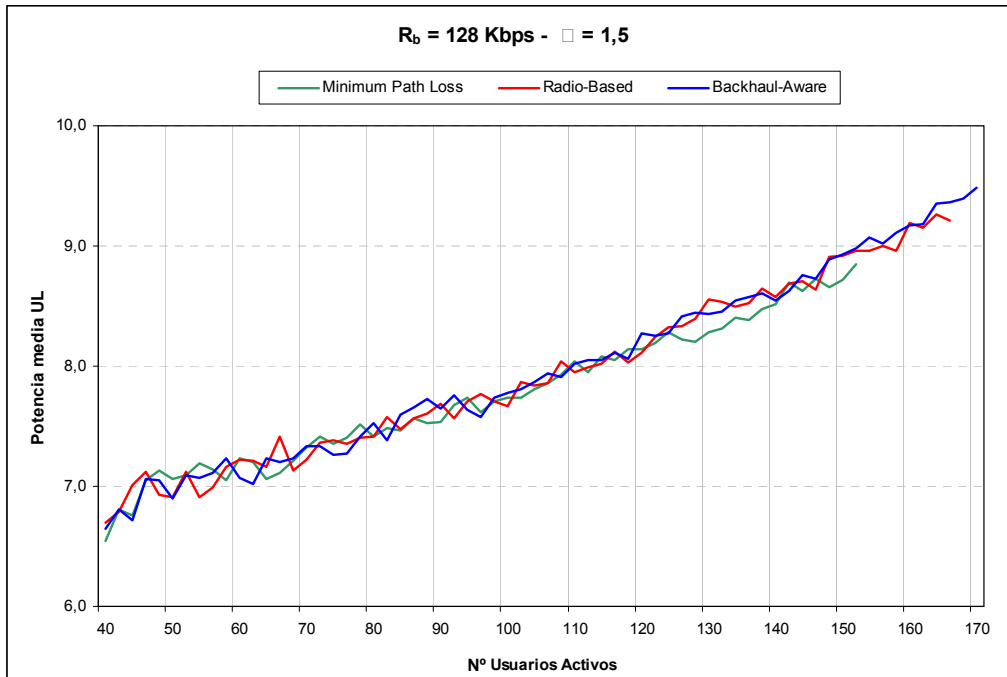


Figura 20. % Potencia media MT vs. Número de usuarios, $R_b=128$ Kbps, $\Phi=1.5$

Usuarios	Potencia media terminal móvil		
	Minimum Path Loss	Radio-Based	Backhaul-Aware
133	8,34 dBm	8,3 dBm	8,3 dBm
156	-	9,0 dBm	9,0 dBm
163	-	-	9,4 dBm

Tabla 14. Consumo medio de potencia TM, $R_b=128$ Kbps, $\Phi=1.5$

Se ha verificado que la estrategia *Backhaul-aware* conlleva un incremento de la potencia en las EB en escenarios con una elevada limitación de capacidad de transporte. Del mismo modo que en el enlace descendente (apartado 6.3.1.1), en el enlace ascendente también se produce un incremento de la potencia necesaria para cada una de las transmisiones de los terminales móviles. Concretando valores, para el caso de 384 Kbps y con un número de usuarios en el sistema de 33, la estrategia BA requiere un incremento de potencia inferior al 10% (lo que corresponde a un aumento de la estrategia RB a BA de 4,9 a 5,3 mW). En el caso de 128Kbps, si tomamos como referencia 156 usuarios, el incremento es menor a un 1%.

6.3.2 Capacidad de transporte no homogénea

A diferencia del análisis considerado en el apartado 6.3.1, donde se asume que todas las estaciones base están provistas por la misma capacidad de transporte, en el presente apartado consideramos un sistema de capacidad de transporte no homogénea. Es decir, se asume que únicamente algunas estaciones base tienen una capacidad de transporte limitada, mientras que el resto de estaciones base disponen de capacidad de transporte suficiente de forma que no constituyen una restricción.

Para modelar la capacidad de transporte de las estaciones base, en este apartado se ha considerado un factor multiplicador de extra de ancho de banda para las estaciones base con restricción de capacidad (referido en el texto como Φ_{limited}) y otro factor de dimensionado para modelar la capacidad de transporte de las estaciones base sin restricción (referido en el texto como $\Phi_{\text{unlimited}}$). En particular, los factores de dimensionado utilizados son :

- $\Phi_{\text{limited}}=1$ o 1.5 - Estaciones base con restricciones de ancho de banda.
- $\Phi_{\text{unlimited}}=3$ - Estaciones base sin restricciones de ancho de banda.

En el primer caso de simulación considerado para evaluar las estrategias de asignación de base en escenarios con capacidad de transporte no homogénea se asume que los usuarios en el sistema tienen una tasa de servicio constante de 384 Kbps. En este contexto, la Figura 21 muestra el número de usuarios (con $R_b=384$ Kbps) que cada estrategia soporta (garantizando un 95% de factibilidad) en función del porcentaje de estaciones base que cuentan con limitación en el transporte ($\Phi_{\text{limited}}=1$).

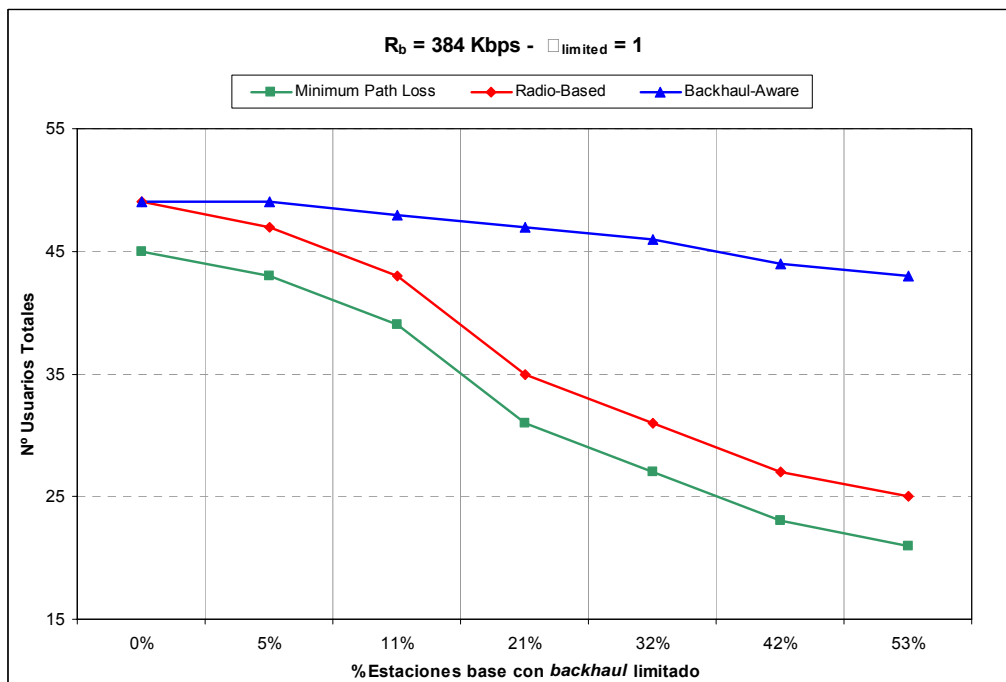


Figura 21. Número de usuarios vs. porcentaje de EB limitadas, $\Phi_{\text{limited}}=1$, $R_b=384$ Kbps

Como ya se había percibido anteriormente (apartado 6.3.1), en condiciones de limitación de ancho de banda, la estrategia propuesta *Backhaul-aware* permite incrementar el número de usuarios satisfechos respecto *Radio-Based*. En el caso de que no exista ninguna estación base con limitación (que correspondería al 0% de EB con limitación en el *backhaul*), y por lo tanto no hay ninguna EB con restricción de ancho de banda (todas con $\Phi_{\text{unlimited}}=3$), las dos estrategias que balancean la carga radio (*Backhaul-aware* y *Radio-based*) obtienen las mismas prestaciones. No obstante, en tales circunstancias se observa que la estrategia MPL obtiene un rendimiento menor, lo que implica que el consumo de recursos radio de esta estrategia es mayor y es menos eficiente desde el punto de vista radio). A medida que en el escenario se incrementa el número de EB con limitación del ancho de banda, se observa

como en las estrategias MPL y RB el impacto es más significativo, mientras que BA permite mitigar en cierta medida el impacto de la limitación de capacidad en algunas estaciones base del escenario.

Si se cuantifican los resultados obtenidos para el caso de 384 Kbps con $\Phi_{\text{limitado}}=1$, se observa un incremento cercano al 12% de usuarios activos con únicamente el 11% de las EB con restricciones en la capacidad de transporte. A medida que aparecen limitaciones de la capacidad de transporte de las estaciones base del sistema, se observa que el impacto en las estrategias MPL y RB es más significativo y disminuyen en mayor medida el número de usuarios totales en el sistema. La estrategia BA permite mitigar en cierta medida el impacto de la limitación de capacidad en determinadas EB del sistema, consiguiendo un beneficio del 34% en número de usuarios para el caso de un 21% de las celdas del escenario afectadas con limitación del ancho de banda.

Se ha analizado el mismo escenario, pero considerado una limitación de capacidad menos restrictiva para las celdas con *backhaul* limitado (factor multiplicador de $\Phi_{\text{limitado}}=1,5$). La Figura 22 muestra los resultados obtenidos, y en ella se observa un comportamiento similar al caso con $\Phi_{\text{limitado}}=1$, aunque más moderado al no tener una limitación tan severa.

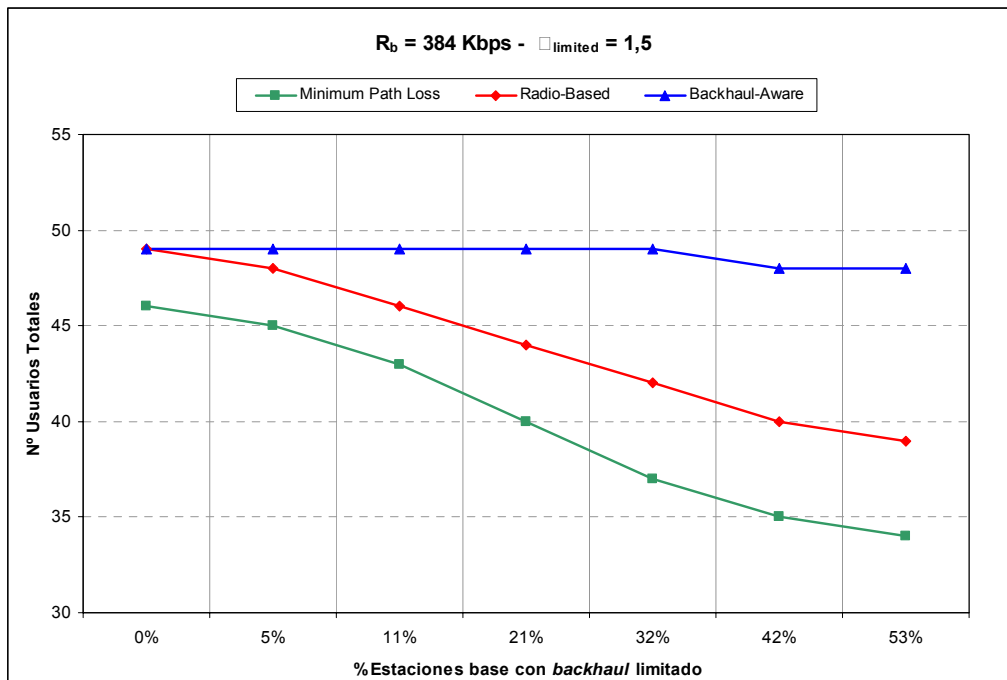


Figura 22. Número de usuarios vs. porcentaje de EB limitadas, $\Phi_{\text{limitado}}=1.5$, $R_b=384$ Kbps

Análogamente se han analizado los mismos escenarios, para el caso de que los usuarios demanden un tasa binaria en el enlace descendente de 128 Kbps. Como se muestra en la Figura 23 y en la Figura 24, en estas condiciones la estrategia *Backhaul-aware* permite incrementar considerablemente el número de usuarios satisfechos en el sistema respecto a la estrategia *Radio-based*, aunque no son destacables porcentualmente si las limitaciones de ancho de banda no son duras.

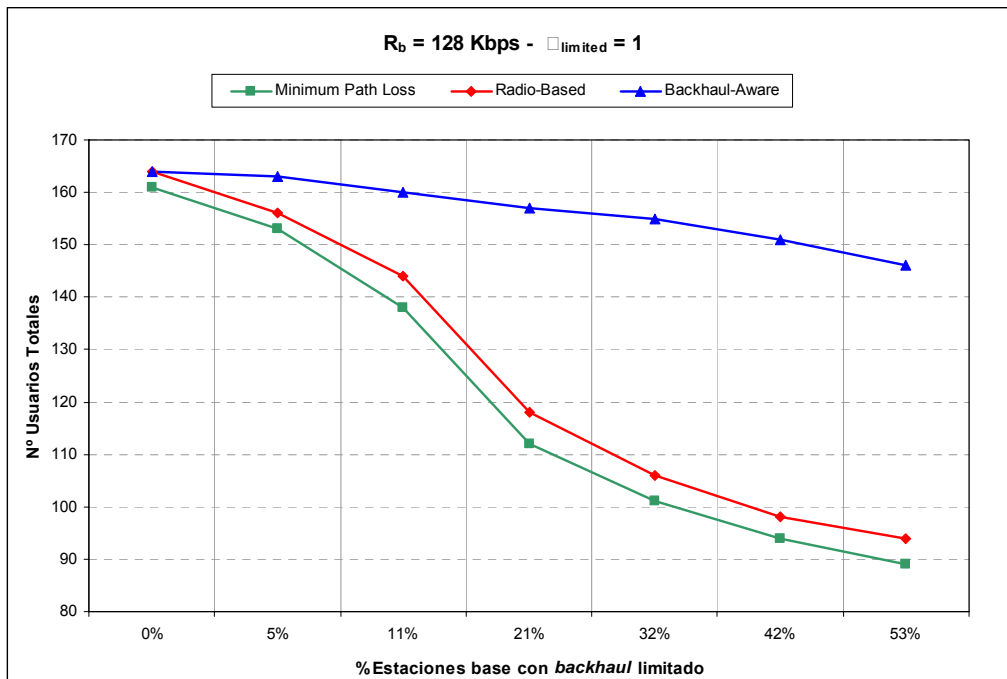


Figura 23. Número de usuarios vs. porcentaje de EB limitadas, $\Phi_{limited}=1$, $R_b=128$ Kbps

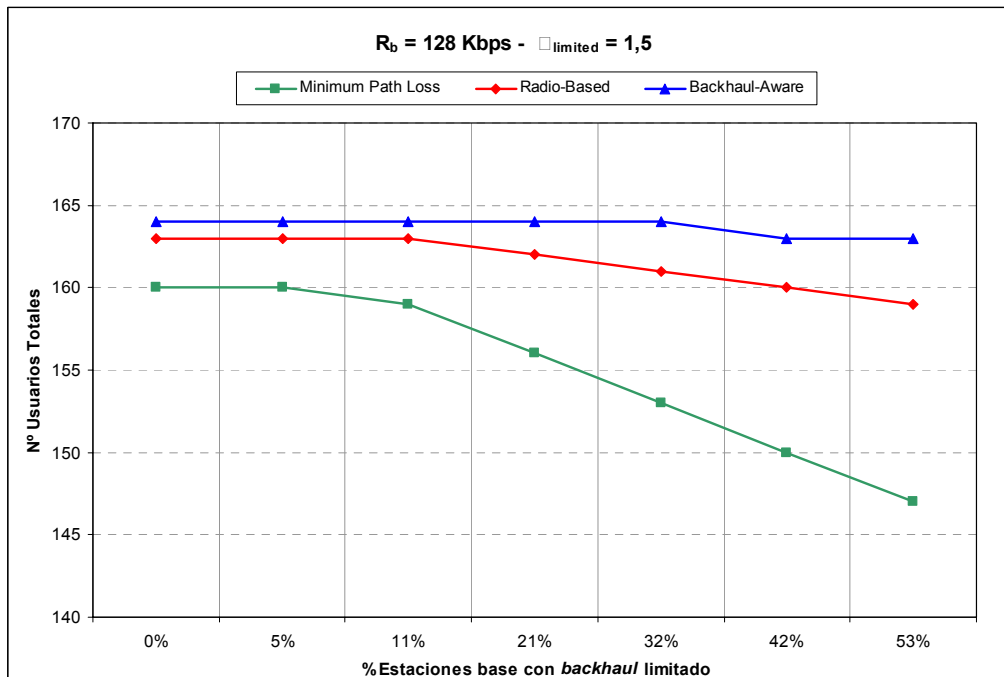


Figura 24. Número de usuarios vs. porcentaje de EB limitadas, $\Phi_{limited}=1.5$, $R_b=128$ Kbps

En ambas gráficas para el caso de una tasa de servicio de 128Kbps, a medida que se incrementa el número de estaciones base afectadas por restricciones de ancho de banda también aumenta la ganancia aportada por BA en cuanto a número de usuarios admitidos por el sistema, dado un porcentaje de

bloqueo determinado. Esta tendencia también se destaca a medida que las restricciones de capacidad de las EB son más elevadas, es decir, disminuye $\Phi_{\text{limited}} = 1$. Se han analizado las prestaciones de las estrategias de asignación *Radio-based* y *Backhaul-aware* en términos del incremento porcentual (en cuanto a número de usuarios satisfechos) que ofrecen respecto a una estrategia clásica como lo es *Minimum Path Loss*. Se ha tabulado para las dos tasas de servicio en la Tabla 15 y la Tabla 16:

EB backhaul limitado	$\Phi_{\text{limited}} = 1$		$\Phi_{\text{limited}} = 1,5$	
	% beneficio respecto MPL			
	Radio-based	Backhaul-aware	Radio-based	Backhaul-aware
0%	9%	9%	7%	7%
5%	9%	14%	7%	9%
11%	10%	23%	7%	14%
21%	13%	52%	10%	23%
32%	15%	70%	14%	32%
42%	17%	91%	14%	37%
53%	19%	105%	15%	41%

Tabla 15. Incremento porcentual de usuarios de BA y RB respecto MPL vs. Φ_{limited} , $R_b=384$ Kbps

EB backhaul limitado	$\Phi_{\text{limited}} = 1$		$\Phi_{\text{limited}} = 1,5$	
	% beneficio respecto MPL			
	Radio-based	Backhaul-aware	Radio-based	Backhaul-aware
0%	2%	2%	2%	3%
5%	2%	7%	2%	3%
11%	4%	16%	3%	3%
21%	5%	40%	4%	5%
32%	5%	53%	5%	7%
42%	4%	61%	7%	9%
53%	6%	64%	8%	11%

Tabla 16. Incremento porcentual de usuarios de BA y RB respecto MPL vs. Φ_{limited} , $R_b=128$ Kbps

Los resultados presentados muestran el beneficio aportado por las estrategias RB y BA frente a MPL, así como la mejora aportada por la estrategia propuesta BA frente a RB en términos del número de usuarios que puede satisfacer el sistema. Cuando las limitaciones de transporte no son homogéneas la estrategia *Backhaul-aware* permite redistribuir la carga con el resto de EB vecinas, de modo que al incrementar el número de EB con limitaciones de ancho de banda, dicha estrategia consigue adaptarse mejor al entorno, minimizando el impacto de estas eventualidades en la red de transporte y permitiendo un mayor número de usuarios en el sistema. Destaca como dichos beneficios están relacionados con la tasa binaria de los usuarios, de modo que a mayor R_b , mayores son los beneficios porcentuales. Se ha representado gráficamente en la Figura 25 y en la Figura 26 el beneficio aportado por la estrategia *Backhaul-aware* respecto la *Radio-based*, en el que se puede observar .

En el caso de $R_b=384$ Kbps y $\Phi_{\text{limited}}=1$, la estrategia BA permite una mejora considerable respecto RB, y se incrementa a medida que se aumenta el número de EB limitadas, mientras que si la limitación no es

tan severa ($\Phi_{\text{limited}}=1,5$) el porcentaje de mejora disminuye. Del mismo modo, para un entorno monoservicio con $R_b=128$ Kbps (Figura 26), la mejora aportada por BA respecto RB también es destacable en el caso de $\Phi_{\text{limited}}=1$, pero para $\Phi_{\text{limited}}=1,5$, es necesario que el más del 50% de las EB estén limitadas para poder observar una mejora superior al 3%.

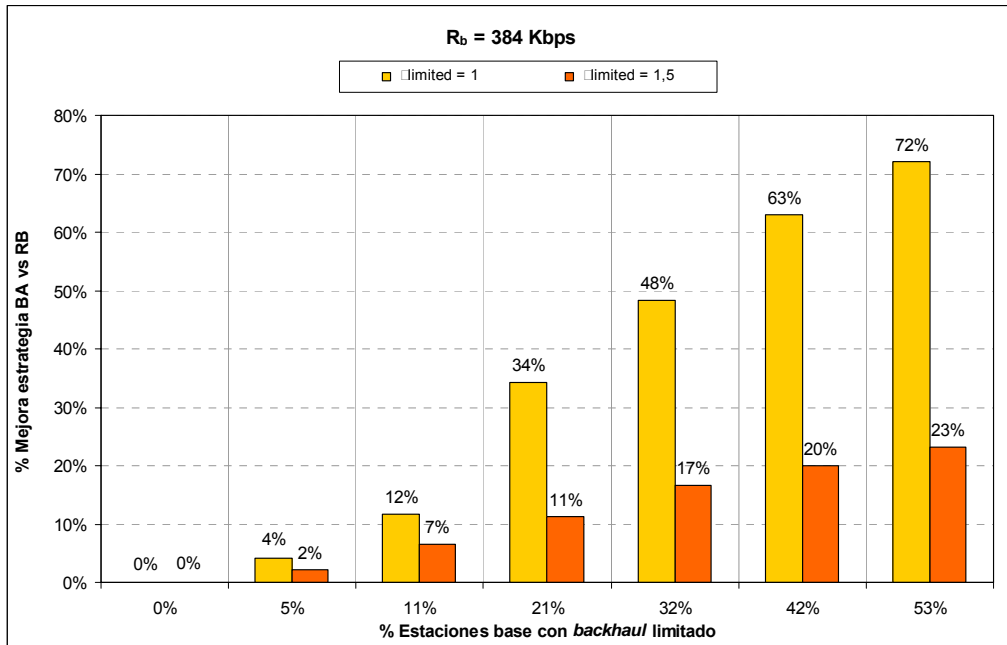


Figura 25. Incremento porcentual de usuarios BA vs RB vs. % EB limitadas y Φ_{limited} , $R_b=384$ Kbps

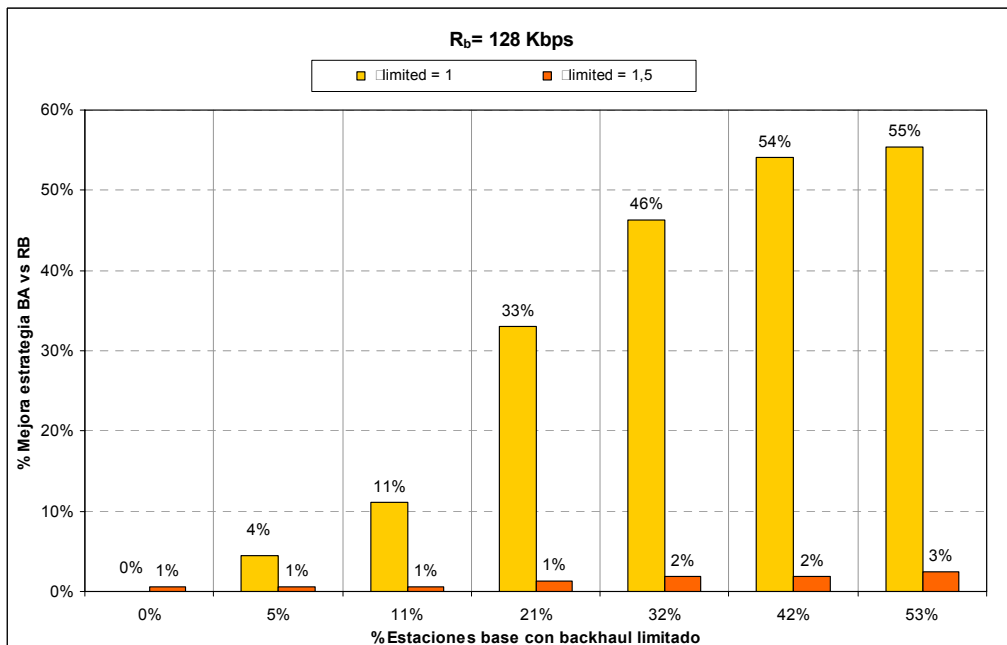


Figura 26. Incremento porcentual de usuarios BA vs RB vs. % EB limitadas y Φ_{limited} , $R_b=128$ Kbps

6.4 Escenarios Multiservicio

En esta sección se extiende el análisis de las estrategias de asignación de base a escenarios más complejos, en donde los usuarios tienen diferentes requerimientos de tasa de servicio en el enlace descendente. En particular, se han considerado de nuevo las dos clases de usuarios 128 Kbps y 384 Kbps. En este sentido, para diferenciar ambos servicios en el proceso de asignación se asume que cada tasa de servicio tiene asociado un "*profit*" determinado. En particular, dicho *profit* se ha incorporado en la función de utilidad empleada en el algoritmo de asignación base de manera que, en función del valor de *profit* establecido para cada servicio, es posible priorizarlos.

Nótese que los costes radio y de transporte de cada asignación están directamente relacionados con la tasa binaria de servicio solicitada, por lo que la utilidad se modifica en función de R_b . Cuanto mayor es la tasa binaria solicitada por el usuario, aumenta el coste radio de la asignación y por lo tanto, su utilidad es menor. La introducción de un parámetro en la función de utilidad de cada asignación permite la priorización de un conjunto de usuarios determinados (en este caso aquellos con mayor R_b), contrarrestando la penalización de las tasas binarias superiores.

A continuación se detallan las expresiones de los conceptos de incorporados en este apartado. Para añadir la funcionalidad de *profits* se modifica la función de utilidad de cada usuario i con la EB asignada j , aumentando la utilidad para las asignaciones de usuarios con el servicio solicitado con mayor *profit*.

$$u_{ij} = \frac{1}{\alpha_{ij}} \cdot profit \quad (43)$$

Para determinar los valores que toma *profit* se ha optado por tomar una relación entera entre ambos servicios:

$$\frac{profit_{384}}{profit_{128}} = K \quad (44)$$

Esta notación permite obtener dos métricas para el análisis del comportamiento de las estrategias. Se define un *profit* total del sistema en función del número de usuarios y del tipo de servicio solicitado. En particular, dicho *profit* es el que se obtendría en el caso de que todos los usuarios en el sistema fuesen asignados.

$$profit_{total} = users_{128} \cdot profit_{128} + users_{384} \cdot profit_{384} \quad (45)$$

Con el fin de medir el beneficio obtenido por la asignación de los usuarios, se ha utilizado el concepto de *revenue*, que se obtiene a partir de sumar el *profit* (ganancia) correspondiente a cada usuario cuya asignación ha resultado factible. En particular, tomando en cuenta que para cada tipo de servicio se han definido diferentes valores de *profits*, es posible determinar el la porción de *revenue* que se obtiene con los usuarios factibles.

$$revenue = \frac{feasible_users_{128} \cdot profit_{128} + feasible_users_{384} \cdot profit_{384}}{profit_{total}} \quad (46)$$

A fin de contabilizar los usuarios factibles en el sistema se ha empleado el siguiente procedimiento. En

caso de que la demanda de recursos por parte de los usuarios asignados a una estación de base, exceda el total de recursos radio y/o transporte disponibles se procede a descartar de manera iterativa usuarios hasta que se satisfagan las restricciones de recursos de la estación de base. El criterio usado para seleccionar los usuarios que podrían descartarse se basa en la utilidad ponderada. En particular, los usuarios que se encuentren asignados a la estación de base que excede las limitaciones de capacidad y que tengan la menor utilidad ponderada son considerados como usuarios que pueden descartarse. Por otra parte, a diferencia de los resultados obtenidos en secciones previas, en la presente sección los resultados correspondientes a los escenarios multiservicio con transporte homogéneo se han obtenido considerando 2000 realizaciones a fin de obtener una mayor resolución en los resultados aquí mostrados.

6.4.1 Servicios sin priorización

Nótese que en las evaluaciones previas (secciones 6.3.1 y 6.4.2) no se hace distinción entre servicios de 128 Kbps y 384Kbps, lo que equivaldría a suponer que ambos servicios proporcionan el mismo profit y que por tanto tienen la misma preferencia. A continuación se resumen los resultados obtenidos en las distintas simulaciones ejecutadas y que permiten observar el número máximo de usuarios capaz de acomodar cada estrategia dependiendo de las condiciones de transporte de la red, así como comparar la estrategia *Backhaul-aware* con *Radio-based* y *Minimum Path Loss*. El escenario inicial considerado se asume el mismo número de usuarios para cada una de las velocidades, es decir la velocidad de transmisión del 50% de los usuarios es de 128 Kbs y el 50% restante tiene una tasa de transmisión de 384 Kbps. La Figura 27 muestra el número de usuarios satisfechos en función del porcentaje de estaciones base del sistema con limitación en su capacidad de transporte ($\Phi_{limited}=1$ o 1.5) y con $\Phi_{unlimited}=3$ para el resto de estaciones.

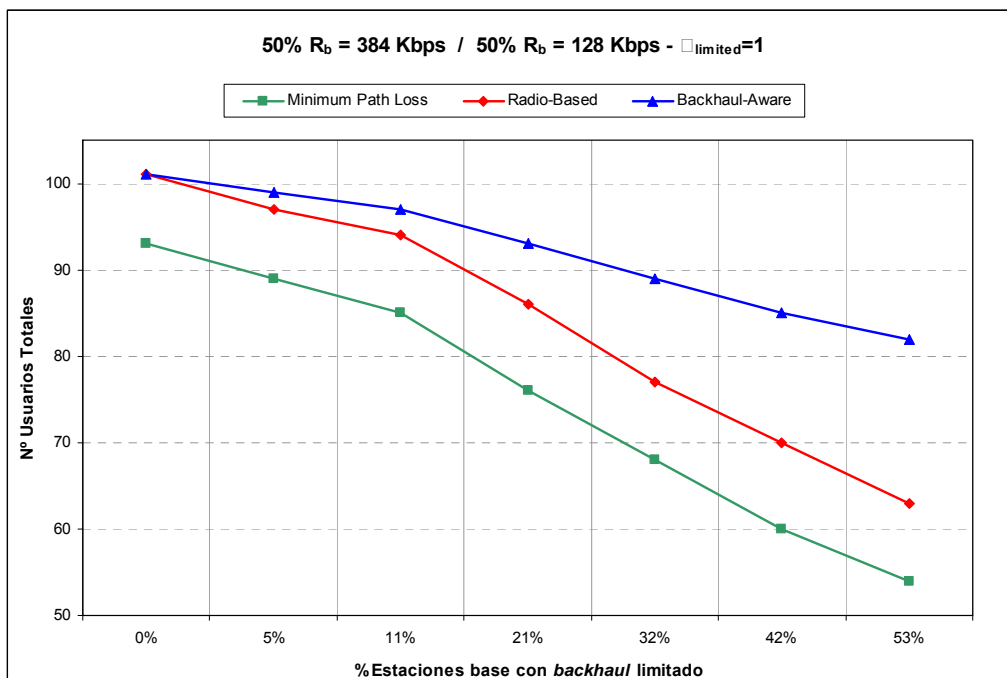


Figura 27. Número de usuarios vs. % EB limitadas, $\Phi_{limited}=1$

Del mismo modo que se ha obtenido en el caso monoservicio (apartado 6.3) la tendencia de las curvas obtenidas para cada estrategia son las mismas, y decrece el número de usuarios en el sistema a medida que se limitan un mayor número de estaciones base en el sistema. En este escenario la estrategia propuesta BA permite incrementar sustancialmente el número de usuarios activos en el sistema respecto el resto de estrategias de referencia, incluso aunque el porcentaje de EB limitadas no sea elevado.

Tomando valores concretos, para una limitación del 11% de las EB con $\Phi_{\text{limitado}}=1$, la aplicación de la estrategia *Backhaul-aware* permite incrementar en número total de usuarios en el sistema en un 14% respecto *Minimum Path Loss* y un 3% respecto *Radio-based*. Para un porcentaje nulo de estaciones base en el sistema limitadas, las estrategias RB y BA convergen ya que equivale a que todas las EB dispongan de un ancho de banda suficiente ($\Phi_{\text{limitado}}=3$). A medida que la red de transporte se encuentra con mayores restricciones de transporte, la ganancia de BA crece sustancialmente. Por ejemplo, con una limitación del 53% y $\Phi_{\text{limitado}}=1$, se consigue incrementar un 52% y del 30% respectivamente.

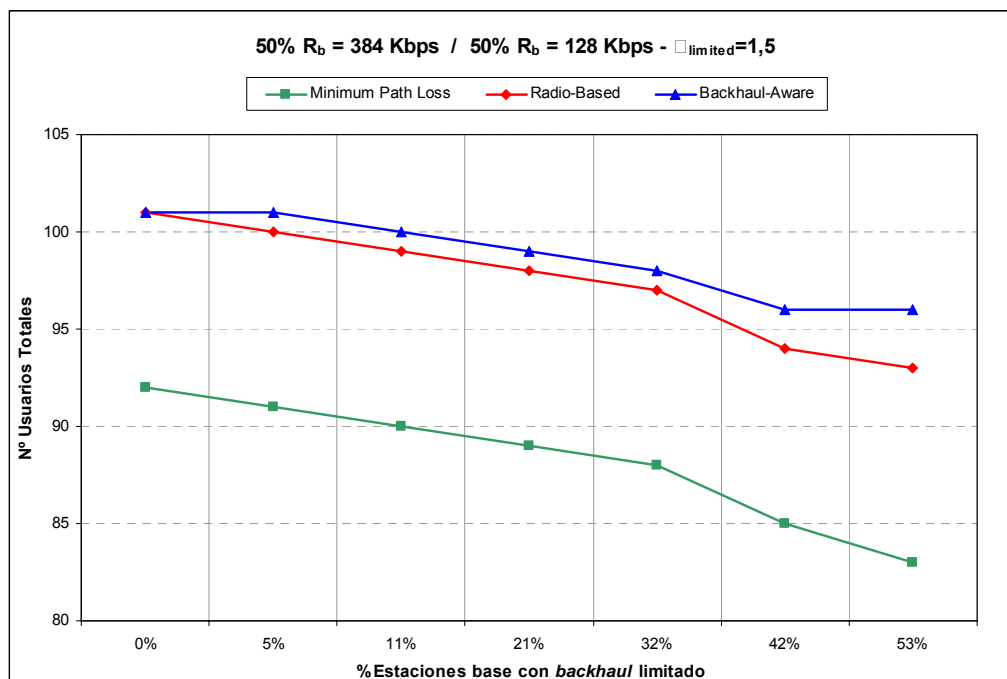


Figura 28. Número de usuarios vs. % EB limitadas, $\Phi_{\text{limitado}}=1.5$

Se replica para el caso que las EB limitadas dispongan de un $\Phi_{\text{limitado}}=1.5$. La Figura 28 muestra de nuevo como las estrategias se comportan con la misma tendencia. Sin embargo, si la limitación de capacidad de transporte no es tan severa, los beneficios de la estrategia BA (aunque siempre superando a *Radio-Based*), se moderan y sólo son destacables para limitaciones en el sistema superiores al 40%. Tomando como punto de referencia la estrategia MPL, se ha elaborado una tabla en la que se indica el porcentaje de incremento de usuarios, para un grado de satisfacción del 95%, que aportan las dos estrategias respecto *Minimum Path Loss*.

EB <i>backhaul</i> limitado	$\Phi_{\text{limited}} = 1$		$\Phi_{\text{limited}} = 1,5$	
	% beneficio respecto MPL			
	Radio-based	Backhaul-aware	Radio-based	Backhaul-aware
0%	9%	9%	10%	10%
5%	9%	11%	10%	11%
11%	11%	14%	10%	11%
21%	13%	22%	10%	11%
32%	13%	31%	10%	11%
42%	17%	42%	11%	13%
53%	17%	52%	12%	16%

Tabla 17. Incremento porcentual de usuarios respecto MPL vs. Φ_{limited} para RB y BA

El beneficio de *Backhaul-aware* respecto *Radio-based* es muy elevado cuando $\Phi_{\text{limited}} = 1$, aunque cuando la restricción de capacidad en las células es menor, el número de estaciones limitadas debe ser mayor al 30% para poder notar un incremento superior al 2%. Para observarlo con mayor precisión se ha representado gráficamente la mejora:

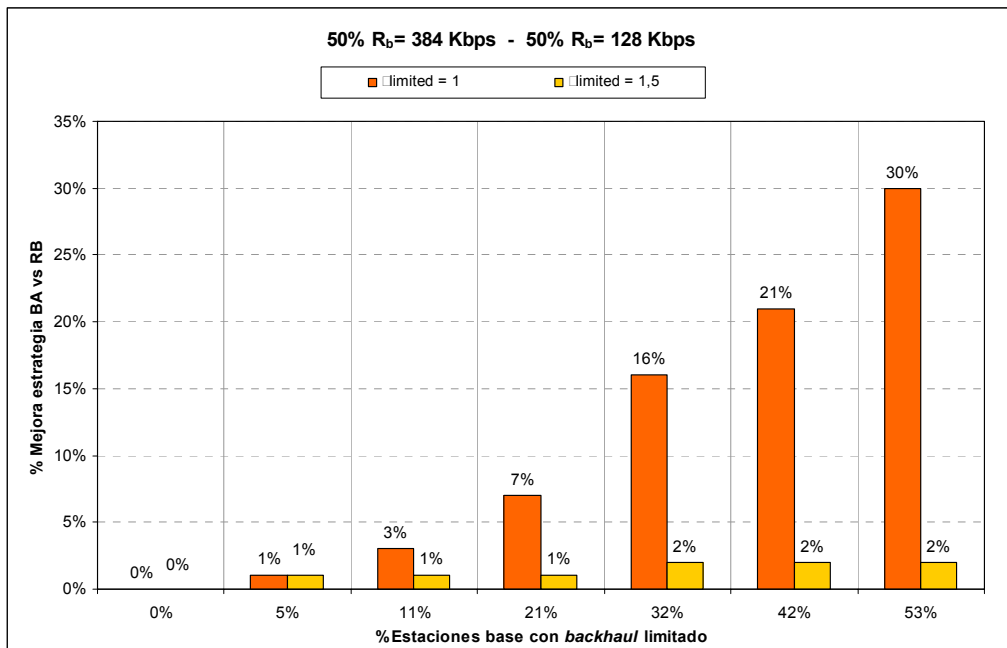


Figura 29. Incremento porcentual de usuarios de BA respecto RB vs. % EB limitadas y de Φ_{limited}

En los escenarios analizados, el número de usuarios para cada tasa binaria seguía una distribución uniforme del 50% para cada R_b . Siguiendo la misma línea se ha querido observar la variación del número de usuarios para un grado de satisfacción del 95%, en función del número de usuarios de 384 Kbps.

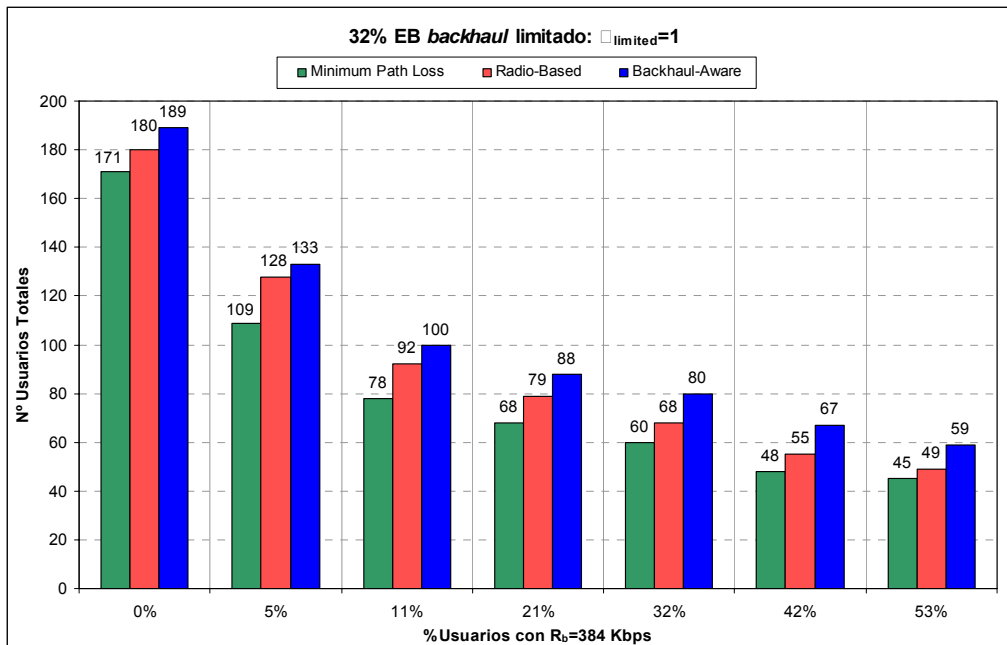


Figura 30. Número de usuarios vs. % Usuarios con $R_b=384$ Kbps, $\Phi_{limited}=1$, 32% EB limitadas

Cabe destacar como una estrategia que considera tanto las restricciones radio como de transporte permite acomodar más usuarios, mostrando las curvas de la gráfica anterior con igual tendencia y separando las de BA y RB a medida que se incrementa el número de usuarios con una tasa mayor.

A mayor número de terminales con servicio de datos a 384 Kbps, menos usuarios totales cabrán en el sistema. Cabe destacar que, como se indica en el apartado 6.3 que la eficiencia de la estrategia propuesta BA respecto el resto es mayor cuanto mayor es R_b . Por lo tanto, es de esperar que el incremento de usuarios que aporta *Backhaul-aware* aumente a mayor porcentaje de usuarios con $R_b=384$ Kbps. Se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 18.

% usuarios $R_b=384$ Kbps	% beneficio respecto RB
0%	5%
20%	4%
40%	9%
50%	11%
60%	18%
80%	22%
100%	20%

Tabla 18. Beneficio en usuarios de BA respecto RB vs. % Usuarios con $R_b=384$ Kbps

6.4.2 Servicios con priorización

Debido a que la función de utilidad planteada en la expresión (43) incorpora el *profit* correspondiente a cada usuario, mediante la definición de *profits* distintos para cada una de las tasas de transmisión

requeridas por los usuarios, sería posible priorizar la asignación de un grupo de usuarios sobre otro. En este contexto, en este apartado se estudia el impacto de la introducción de prioridades de servicio en las estrategias de asignación de base. Los resultados analizados en este apartado únicamente corresponden a las estrategias *Backhaul-aware* y *Radio-based* ya que la función de utilidad anteriormente referida únicamente interviene en tales estrategias y no así para el caso de la estrategia *Minimum Path Loss*. Del mismo modo que en el apartado anterior 6.4.1, los escenarios analizados son multiservicio, con limitación del *backhaul* no homogéneo, y considerando los siguientes parámetros:

- Capacidad de transporte no homogénea con 32% estaciones base limitadas con $\Phi_{\text{limited}}=1$, y $\Phi_{\text{unlimited}}=3$ para el resto.
- Multiservicio con una distribución uniforme de la R_b de los usuarios del 50% para 128 Kbps y 50% para 384 Kbps.
- Relación entera entre *profits* K , superior para la mayor R_b .
- Simulación con 1.000/2.000 *snapshots* para obtener una alta resolución en los resultados.

En el inicio del capítulo 6.4 se detallan las expresiones (43) a (46) usadas para introducir prioridades de un tipo de usuarios respecto otros. Nótese que en la función de utilidad se ha introducido un factor multiplicador K (definido en la expresión (44)), de manera que a medida que se aumenta su valor, se incrementa la prioridad de los usuarios con $R_b=384$ frente a los usuarios con $R_b=128$ Kbps. Para trabajar con el mínimo número de variables se ha tomado *profit*=1 para $R_b=128$ Kbps de modo que su alteración en el algoritmo de asignación sea mínimo. De este modo el *profit* de los usuarios de 384 Kbps es directamente el factor K y únicamente se ve afectada la función de utilidad para la tasa 384 Kbps. Fijémonos que, dado que la utilidad se obtiene a partir de la inversa del coste de la interfaz radio, al añadir el valor del *profit*, realmente se está modificando la utilidad real para que el algoritmo de asignación tome decisiones no sólo basadas en la mejor opción a nivel de recursos.

Los escenarios contemplados en la obtención de resultados de la presente sección pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Se han ejecutado escenarios con un determinado número de usuarios totales en el sistema. A partir de los resultados obtenidos se busca comparar las estrategias mediante un parámetro que permita valorar la satisfacción de la red, el *revenue*.
- Posteriormente se han simulado escenarios con un número total de usuarios en el sistema de manera que se alcance un grado de satisfacción del 95%, diferente para cada estrategia. El objetivo en este caso es observar el comportamiento de cada una de las estrategias frente a la introducción de *profits*.

Inicialmente, dado que la introducción de un esquema con *profits* provoca una variación del número de usuarios factibles para cada velocidad y cada estrategia, se ha buscado un parámetro que permita valorar el beneficio que obtiene la red. El concepto de *revenue* como satisfacción de la red es un valor que nos permite, de un modo global, determinar el efecto que se produce en el funcionamiento de las estrategias de asignación cuando se introduce un elemento externo como es el *profit*. Se ha tabulado el valor del *revenue* en función de la relación entre *profits* K para ambas velocidades de transmisión. El valor del *revenue* no debe calcularse para escenarios distintos porque no permitiría comparar estrategias,

sino que debe aplicarse a un entorno concreto, con un número determinado de usuarios en el sistema.

Se han realizado simulaciones y se presentan dos casos significativos (se han escogido teniendo en cuenta el número de usuarios en el sistema para obtener un grado de satisfacción del 95% en el caso de un escenario con las mismas condiciones que se acaban de indicar pero sin priorización (relación entre *profits* $K=1$) :

- 78 usuarios: número de usuarios totales en el sistema para obtener una satisfacción del 95% con la estrategia RB y *profits* iguales.
- 89 usuarios: número de usuarios totales en el sistema para obtener una satisfacción del 95% con la estrategia BA y *profits* iguales.

En la Figura 31 se observa como las curvas de *revenue* de ambas estrategias presentan tendencias similares. Sin embargo, el *revenue* para la estrategia BA es superior al de RB de una manera constante, y únicamente decrece ligeramente a medida que se incrementa la relación entre *profits* K . Cabe destacar que la estrategia *Backhaul-aware* consigue valores de *revenue* similares para 89 usuarios como *Radio-based* para 78 usuarios. Para la misma capacidad de satisfacción de red, la estrategia BA permite 9 usuarios más en el sistema que RB.

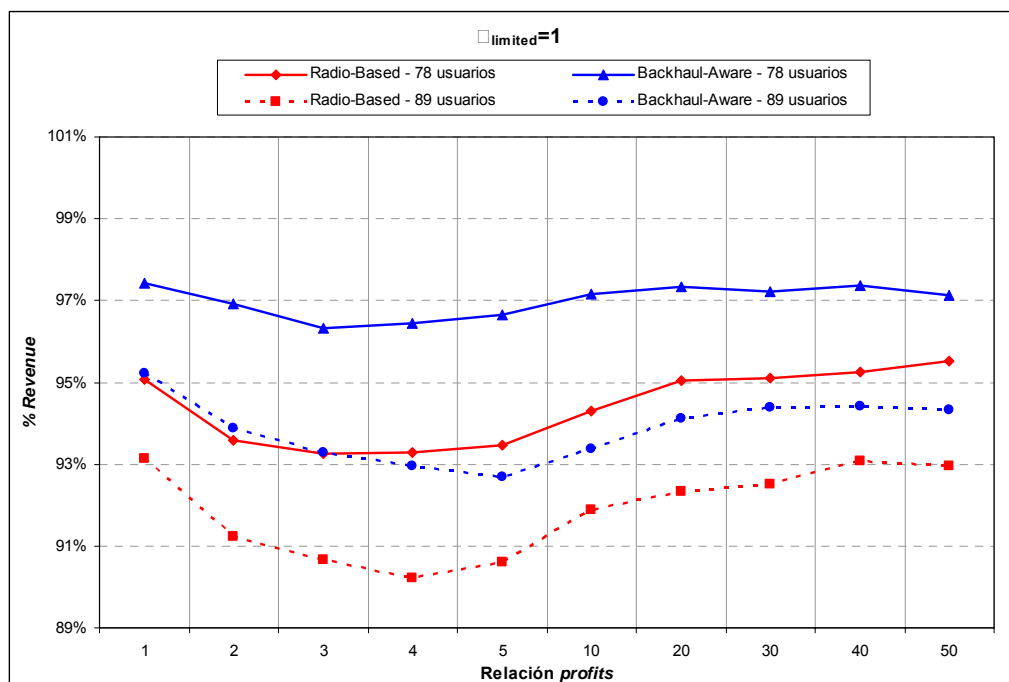


Figura 31. % Revenue vs. relación de profits K , $\Phi_{limited}=1$

Para poder concretar la mejora que muestra el *revenue* entre las estrategias de asignación, se ha realizado un diagrama con el valor absoluto del incremento del *revenue* de BA respecto RB (Figura 32). Se observa como el *revenue* proporcionado por la estrategia *Backhaul-aware* es siempre superior a *Radio-based*, en media aproximadamente un 2%.

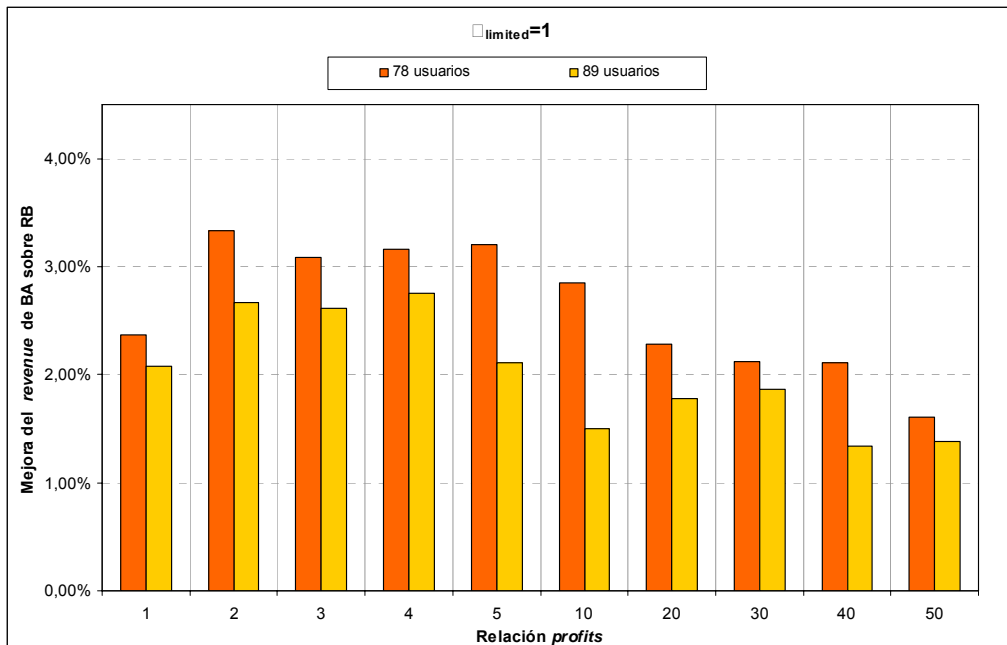


Figura 32. Mejora del revenue BA respecto RB, vs. relación de profits K, $\Phi_{limited}=1$

Ahora bien, el valor del *revenue* permite comparar el rendimiento de las estrategias, pero no consigue distinguir el comportamiento de la introducción del parámetro K en las asignaciones realizadas por cada una de las estrategias de asignación de base. A continuación se presentan los resultados obtenidos para el segundo conjunto de escenarios, en los que se ha buscado obtener más detalles acerca del comportamiento de las estrategias mediante la representación de los siguientes resultados en función de la relación entre prioridades K:

- Número de usuarios totales, de 128 Kbps y de 384 Kbps en el sistema para obtener un grado de satisfacción total del 95%
- Número de usuarios satisfechos, de 128 Kbps y de 384 Kbps en el sistema para obtener un grado de satisfacción total del 95%
- Grado de satisfacción particular para 128 Kbps y para 384 Kbps para un grado de satisfacción global del 95%

La Figura 33 y la Figura 34 muestran como el grado de satisfacción para cada tasa de servicio se ve modificada en función de los *profits* que se introducen en el sistema. Cabe destacar que para el caso de un entorno multiservicio sin priorización, los usuarios de 384 Kbps tendrán un grado de satisfacción inferior a los de 128 Kbps. Es debido a que el coste radio y el de transporte de un usuario es superior cuanto mayor es su R_b , su utilidad es menor y por lo tanto, una estrategia que intente maximizar la utilidad total tenderá a penalizar a los usuarios con mayores R_b .

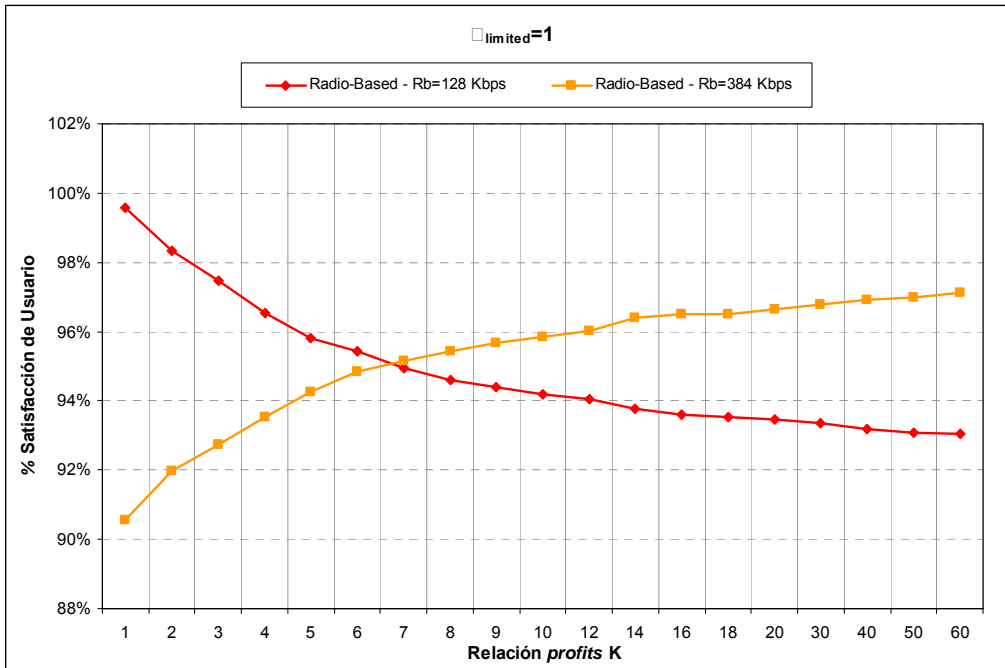


Figura 33. % Satisfacción para RB vs. relación de profits K, $\Phi_{limited}=1$

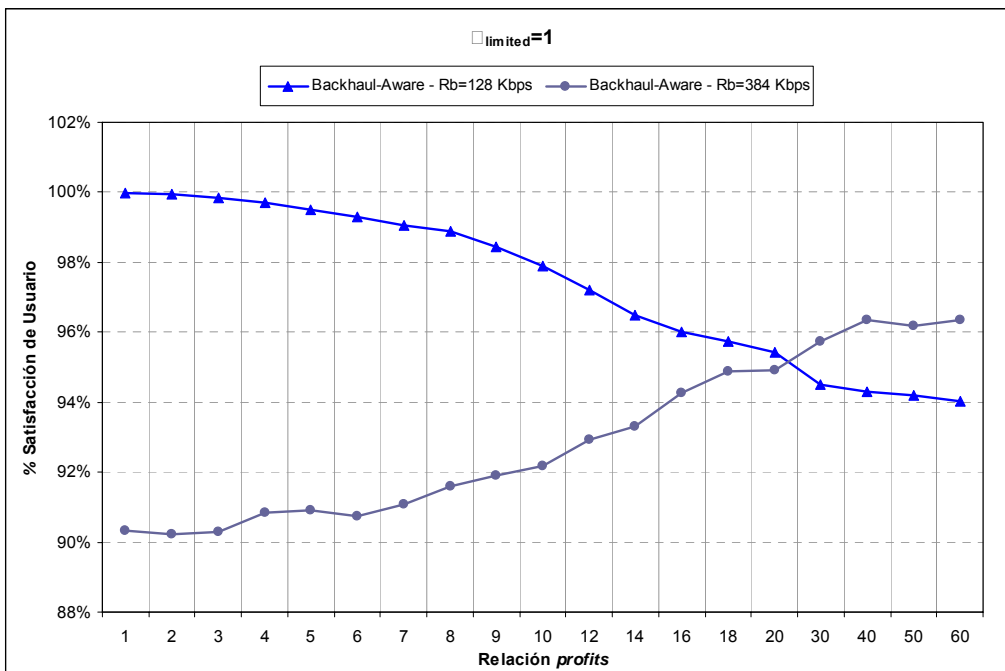


Figura 34. % Satisfacción para BA según R_b vs. la relación entre profits K, $\Phi_{limited}=1$

Las pruebas realizadas corroboran los resultados previstos. Para una relación entre profits K=1, mientras que prácticamente el 100% de los usuarios de 128 Kbps son servidos, los usuarios de 384 Kbps tienen un grado de satisfacción del 90%. Estos porcentajes se dan para las dos estrategias analizadas. En el

caso de *Radio-based*, a medida que se incrementa la relación entre *profits*, los grados de satisfacción para cada tasa de transmisión se igualan, de modo que se consigue un 95% para ambas velocidades para $K=7$. La estrategia propuesta *Backhaul-aware*, frente a la asignación de *profits* requiere valores de K más elevados. Para $K=7$ consigue únicamente incrementar ligeramente el grado de satisfacción de los usuarios de 384 Kbps de un 90,33% a un 91,07%, mientras que para 128 Kbps disminuye del 99,98% al 99,06%. Las variaciones del grado de satisfacción para cada R_b es poco apreciable hasta que no se alcanza una relación de $K=20$. Las tendencias de las curvas son similares, aunque el punto de cruce al 95% para ambas velocidades está desplazado para BA. En la Tabla 19 se plasma, para distintos puntos claves, la distribución de los grados de satisfacción en función de R_b y de la estrategia de asignación.

	N=1		N=7		N=20	
	128 Kbps	384 Kbps	128 Kbps	384 Kbps	128 Kbps	384 Kbps
Radio-based	100%	91%	95%	95%	93%	97%
Backhaul-aware	100%	90%	99%	91%	95%	95%

Tabla 19. % Satisfacción de usuario en función de K y R_b

No obstante, se debe tener en cuenta que para cada estrategia se está analizando un sistema con un número distinto de usuarios en el sistema. Partiendo de 78 usuarios para un 95% en el caso de RB y de 89 usuarios para BA, el parámetro *profit* modifica el número de usuarios totales en el sistema.

En la Figura 35 se observa la variación de usuarios totales para cada estrategia. *Radio-based* disminuye el número total de usuarios de manera constante siempre que se usa priorización. *Backhaul-aware* inicialmente incrementa el número de usuarios activos en el sistema hasta que consigue igualar los porcentajes de satisfacción para cada R_b , y entonces decrece el número de usuarios satisfechos.

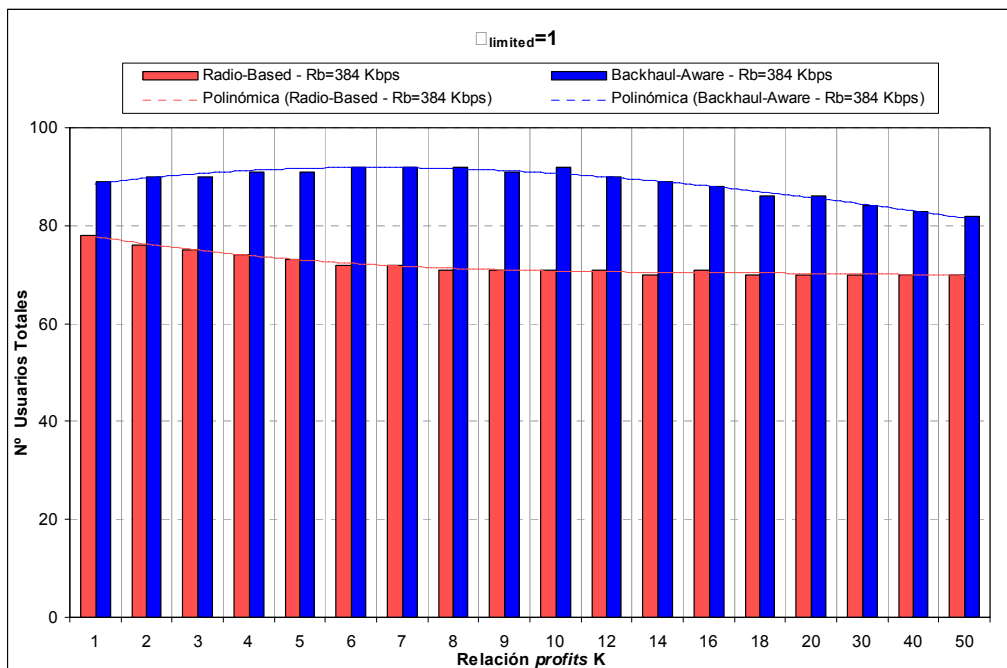


Figura 35. Número de usuarios totales para 95% vs relación de profits K , $\Phi_{limited}= 1$

Las gráficas de la Figura 36 y la Figura 37 detallan la evolución del número absoluto de comunicaciones satisfechas para cada velocidad de transmisión para RB y BA. Para *Radio-based* tomando el margen entre $K=1$ y $K=7$, el número de usuarios con $R_b=128$ Kbps disminuye (-11,4%), pero también lo hace el número de usuarios con 384 Kbps (-3,7%). Sin embargo, la estrategia *Backhaul-aware* tienen un comportamiento ligeramente distinto frente a los profits, y si se toma ahora el mismo margen, que en este caso corresponde a entre $K=1$ y $K=20$, el número de usuarios de 128 Kbps decrece en menor medida (-7,8%) y consigue incrementar ligeramente los de 384 (1,4%).

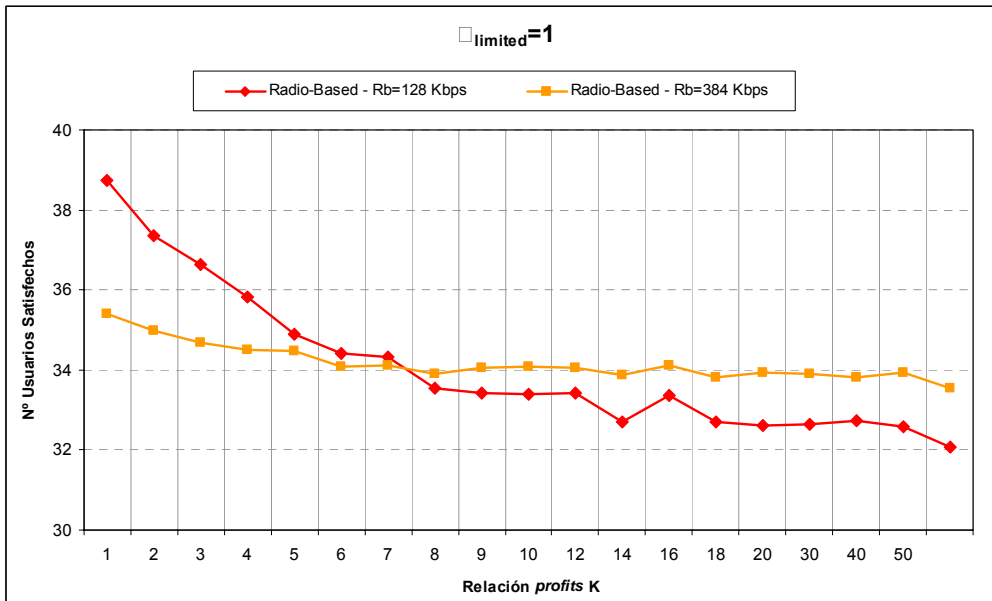


Figura 36. Número de usuarios satisfechos para RB según R_b vs. relación entre profits K , $\Phi_{limited}=1$

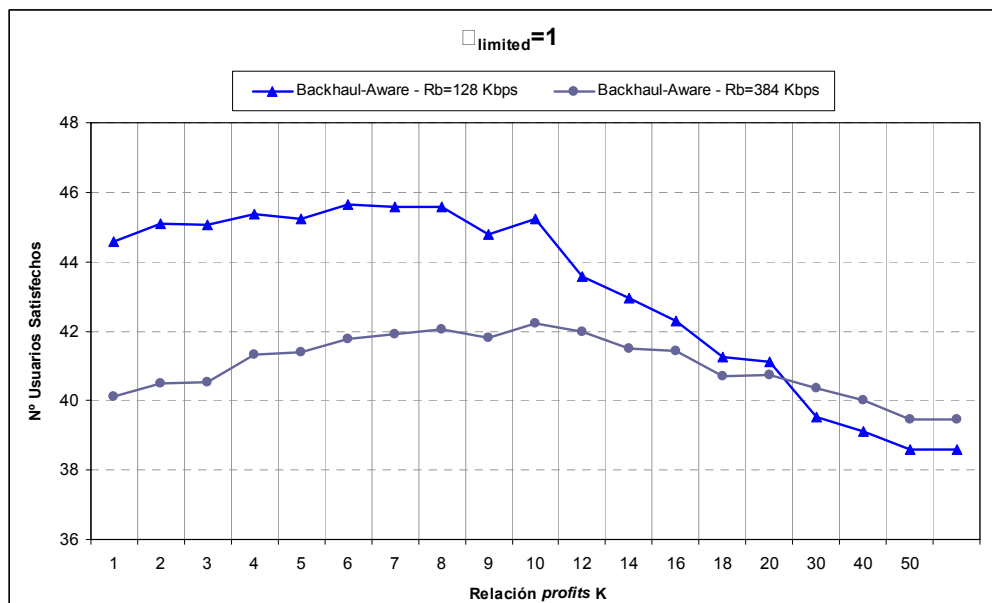


Figura 37. Número de usuarios satisfechos para BA según R_b vs. la relación entre profits K , $\Phi_{limited}=1$

La Tabla 20 muestra los valores absolutos del número de usuarios para cada uno de los puntos clave (N° no enteros ya que son resultados estadísticos obtenidos de la ejecución de múltiples realizaciones).

	N=1		N=7		N=20	
	128 Kbps	384 Kbps	128 Kbps	384 Kbps	128 Kbps	384 Kbps
Radio-based	38,7	35,4	34,3	34,1	32,6	33,9
Backhaul-aware	44,6	40,1	45,6	41,9	41,3	40,5

Tabla 20. Número de usuarios satisfechos en función K y R_b

Si en lugar de buscar un grado de satisfacción para las dos R_b del 95% nos fijamos en un 98% para 128 Kbps y un 92% para 384 Kbps, los resultados obtenidos muestran como:

- *Radio-based* lo consigue para $K=3$, el sistema en estas condiciones acepta a 37 usuarios de 128 Kbps y 35 de 384 Kbps.
- *Backhaul-aware* lo consigue para $K=10$ y en este caso el sistema acepta a 45 usuarios de 128 Kbps y 42 de 384 Kbps.

Para conseguir este giro en los grados de satisfacción, RB lo hace a costa de perder un 3,8% de usuarios totales respecto a no usar *profits*. En cambio, la estrategia propuesta BA consigue incrementar un 3,2% de usuarios. La Figura 38 representa la ganancia de la estrategia BA respecto RB, a nivel de usuarios totales, en función de la tasa de servicio y considerando un grado de satisfacción objetivo es del 95%. Se concluye de nuevo como la estrategia propuesta ofrece un comportamiento más eficiente incluso con priorización por R_b , permitiendo incrementar el número de usuarios entre un 15% y un 25% respecto el uso de la estrategia *Radio-based*, que considera únicamente las restricciones radio del sistema.

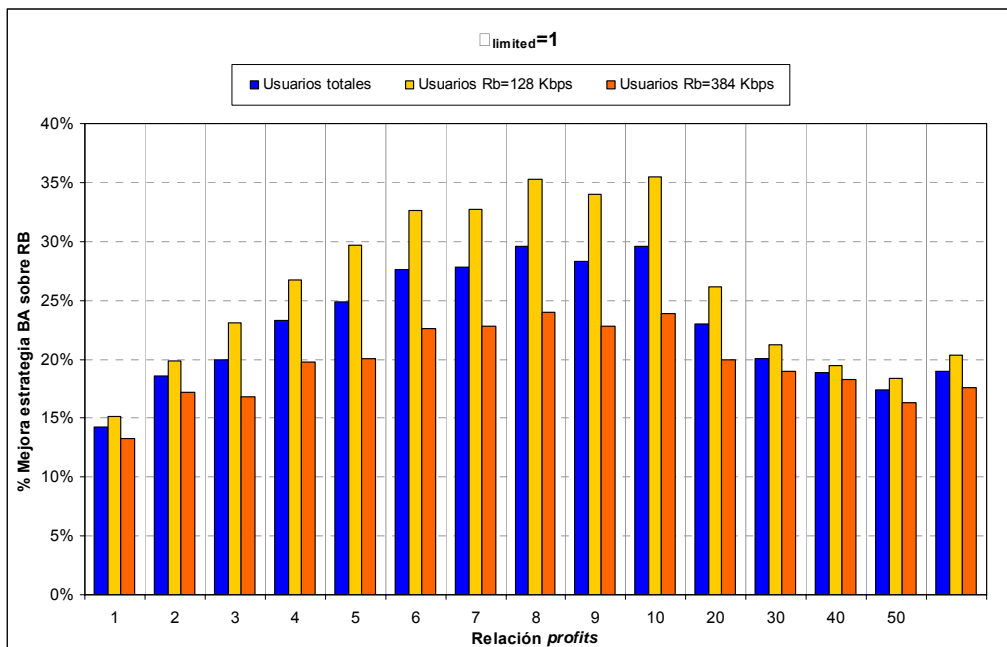


Figura 38. Incremento porcentual en número de usuarios satisfechos vs relación de profits K , $\Phi_{limited}=1$

6.4.3 Resumen

En este capítulo se han analizado las prestaciones de las estrategias de asignación de base descritas en el capítulo 4, para distintas condiciones acerca del tipo de servicio solicitado por el usuario y de la restricción de capacidad de transporte existente en las estaciones base.

Los resultados obtenidos de la evaluación de las estrategias de asignación de base en todos los escenarios examinados permiten concluir que la estrategia propuesta *Backhaul-aware* es capaz de soportar un mayor número de usuarios que las estrategias de referencia, analizado particularmente para un grado de satisfacción en el sistema del 95%.

En un contexto monoservicio con capacidad de transporte homogénea en todas las estaciones base, la estrategia BA aporta mayor beneficio a mayor tasa de transmisión binaria. Cuando los usuarios demandan servicio de tasa de transmisión elevada, el sistema es capaz de soportar menos usuarios, resultando más decisivo a qué estación base se asigna cada uno de los usuarios. Dado que *Backhaul-aware* considera el recurso de capacidad de transporte en las EB, acomoda más usuarios en el sistema realizando asignaciones no óptimas en el aspecto radio, pero sí considerando de modo global todas las restricciones existentes en el sistema. En este entorno se ha estudiado el impacto de la estrategia BA en el consumo de potencia de las EB y los terminales móviles. Con el objetivo de cumplir con las limitaciones de la capacidad de transporte, al realizar asignaciones con mayores pérdidas de propagación en el enlace entre usuario y estación base, la potencia transmitida en ambos enlaces de la comunicación se incrementa.

En sistemas monoservicio con una capacidad de transporte de las EB no homogénea se corroborado el beneficio en número de usuarios y grado de satisfacción que aporta el uso de la estrategia *Backhaul-aware*. Esta ganancia destaca en aquellos escenarios con usuarios con tasas de transmisión de 384 Kbps y en aquellos en los que la limitación de capacidad de transporte en las estaciones base limitadas es severa ($\Phi_{\text{limited}}=1$).

El análisis de escenarios multiservicio con transporte no homogéneo y sin prioridades ha constatado de nuevo que la estrategia BA permite que el sistema sea más robusto frente a degradaciones o alteraciones en el ancho de banda disponible en las EB. A un mayor número de estaciones base con limitación de capacidad de transporte, consigue sostener la caída de usuarios satisfechos y acomodar un mayor número de usuarios en el sistema. Los escenarios que además incluyen un parámetro de priorización de los usuarios en función de su tasa binaria también han permitido obtener un resultado satisfactorio acerca de la mejora que aporta BA respecto estrategias que sólo consideran las restricciones de capacidad radio en el sistema.

7 Conclusiones

En este proyecto de fin de carrera se ha evaluado el problema de asignación de estación de base en el contexto de redes celulares cuya interfaz radio está basada en WCDMA. Dicho problema se ha planteado como un problema de optimización, que tiene por objeto maximizar la utilidad total de las asignaciones en el sistema, sujeto a una serie de restricción de recursos en la interfaz radio y en la red de transporte.

Para resolver el problema planteado se han definido dos posibles algoritmos. El primero de ellos consiste en un algoritmo que utiliza la técnica denominada Simulated Annealing, mientras que el segundo algoritmo se basa en el uso de los Multiplicadores de Lagrange. A fin de evaluar el problema de asignación de base en condiciones de limitación de capacidad transporte en las estaciones base, se ha utilizado el segundo algoritmo planteado.

La evaluación del problema de asignación de base se ha realizado considerando un sistema celular de 19 celdas, donde se asume que cada estación base dispone de una cantidad de recursos en la interfaz radio y en la red de transporte. Los resultados de simulación demuestran que la estrategia propuesta (denominada *Backhaul-aware*, *BA*), que considera la capacidad de transporte en la toma de decisión, permite mejorar el grado de satisfacción de los usuarios, o lo que es equivalente, un mayor número de usuarios satisfechos, respecto otras estrategias que basan la decisión de asignación únicamente en criterios relacionados con el rendimiento de la interfaz radio.

Para corroborar las afirmaciones acerca de las bondades de la estrategia *Backhaul-aware* se detallan ampliamente en el capítulo 6 los resultados de la aplicación de las distintas estrategias escogidas. Inicialmente se definen escenarios monoservicio en los que se realiza la simplificación de que todos los usuarios en el sistema solicitan un servicio con la misma tasa de transmisión. Este entorno permite obtener resultados preliminares acerca del incremento de usuarios activos en el sistema que conlleva el uso de la estrategia propuesta. En estos escenarios monoservicio se ha obtenido un incremento significativo en el número de usuarios activos que permite acomodar la estrategia *BA*, tanto para un sistema con limitación de capacidad de transporte de las estaciones base homogénea como no homogénea. Además, se ha analizado el posible impacto negativo que pueda comportar la estrategia. Dado que *Backhaul-aware* tiene en cuenta las restricciones de radio y de transporte, realiza asignaciones que no son siempre las mejores en cuanto al aspecto radio. Por este motivo se ha analizado el impacto de la estrategia en la potencia necesaria en cada uno de los enlaces de la comunicación, y se ha comprobado que, aunque provoca mayores requerimientos de potencia, dicho incremento es asumible por ambas partes sin que sea limitante.

Para finalizar también se han considerado escenarios donde los usuarios requieren una tasa de transmisión binaria distinta. A estos escenarios se les ha denominado multiservicio, y en donde se han incorporado los conceptos de *profit* y *price* a fin de distinguir los usuarios que tienen requerimientos de tasa de transmisión diferentes. De nuevo el uso de la estrategia *Backhaul-aware* conlleva un incremento de usuarios respecto *Radio-based*. En tales escenarios, se ha observado que las prestaciones de la estrategia propuesta son superiores a las estrategias de asignación de referencia. En este contexto, el uso de *profits* para cada tipo de tasa de transmisión permite controlar el comportamiento de las asignaciones, de forma que es posible dar mayor peso a los usuarios que se desee, según convenga.

Este trabajo ha permitido corroborar que en todos los escenarios analizados, el uso de una estrategia de asignación de base (en particular BA) que, además de las propias restricciones de la interfaz radio, incorpore las restricciones de la capacidad de transporte en las EB, permite prevenir eventualidades o posibles situaciones de congestión en la red de transporte. De este modo, debido al incremento de usuarios y a las actuales exigencias de los servicios de datos en las redes celulares WCDMA, se pretende hacer un uso más eficiente también de los recursos de la red de transporte y así evitar que el *backhaul* se convierta en el cuello de botella, a la vez que permite una reducción de los costes totales de operación del sistema.

8 Bibliografía

- [1] H. Galeana, F. Novillo, R. Ferrús, "A Cost-based Approach for Base Station Assignment in Mobile Networks with Limited Backhaul Capacity", IEEE Globecom 2008.
- [2] F. Novillo, H. Galeana, A. Lainz, R. Ferrús, J. Olmos, "Performance Analysis of transport and radio based balancing strategies for BS assignment in mobile access networks", PIMRC 2008, IEEE Sept. 2008.
- [3] H. Galeana, F. Novillo, R. Ferrús, J. Olmos, "A Base Station Assignment Strategy for Radio Access Networks with Backhaul Constraints", *ICT Mobile Summit*, June 2008.
- [4] H. Galeana, A. Lainz, R. Ferrús, "User Allocation Algorithm with Rate Guarantees for Multi-rate Mobile Networks with Backhaul Constraints", VTC Spring 2009, IEEE April 2009.
- [5] H. Holma and A. Toskala, *WCDMA for UMTS*, Radio Access for Third Generation Mobile Communications, John Wiley and Sons, 2004.
- [6] TS 25.101 V6.18.0 (2008-09) "User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)". 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network (Release 6).
- [7] TS 25.933 V5.4.0 (2003-12) "IP Transport in UTRAN Work Task Technical Report". 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network (Release 5).
- [8] TS 25.942 V6.4 (2005-03) "Radio Frequency (RF) System Scenarios". 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network (Release 6).
- [9] AF-PHY-0086.001 "Inverse Multiplexing for ATM (IMA) Specification Version 1.1" The ATM Forum Technical Committee.
- [10] K. A. Dowland, B. Adenso Díaz, "Diseño de Heurísticas y Fundamentos del Recocido Simulado". *Inteligencia Artificial*, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial No. 20 (2001), pp 34-52.
- [11] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, New Series, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, May 1983.
- [12] N. Metropolis, A.W. Rosenbluth, M.N. Rosenbluth, A.H. Teller, and E. Teller, "Equations of State Calculations by Fast Computing Machines", *Journal of Chemical Physics*, 21(6): pp1087-1092, 1953.
- [13] M. Moser, D. P. Jokanovic, and N. Shiratori, "An Algorithm for the Multidimensional Multiple-choice Knapsack Problem" *IEICE Transactions Fundamentals Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E80-A, no. 3, March 1997.
- [14] H. Everett, "Generalized Lagrange Multiplier Method for Solving Problems of Optimum Allocation of Resources", *Operations Research*, vol. 2, 1963.
- [15] R. D. Yates, "A Framework for Uplink Power Control in Cellular Radio Systems," *IEEE J. Select. Areas in Communications*, Vol. 13, No 7, Sept. 1995
- [16] F. Adelantado, O. Sallent and J. Pérez-Romero, "On WCDMA Base Station Selection Criteria" *IEEE Comm. Letters*, Vol. 10, No. 4, April 2006.
- [17] D. Amzallag, R. Bar-Yehuda, D. Raz and G. Scalosub, "Cell Selection in 4G Cellular Networks", *IEEE Infocom 2008*, The 27th Conference on Computer Communications, pp 700-708, 2008.
- [18] F. Rashid-Farrokhi, K. J. Ray Liu and L. Tassiulas, "Downlink Power Control and Base Station Assignment", in *IEEE Communications Letters*, vol. 1, no. 4, July 1997
- [19] C. Makaya and S. Aïssa, "Joint Scheduling and Base Station Assignment for CDMA Data Networks" in *Proc. Of IEEE VTC 2003-Fall* vol. 3, pp. 1693-1697, 2003

- [20] C. Makaya and S. Aïssa, "Joint Packet Scheduling and Dynamic Base Station Assignment for CDMA data networks" *Int. J. Commun Syst*, Wiley InterScience 2007
- [21] J. Lee, R.R. Mazumdar and N. B. Shroff, "Joint Resource Allocation and Base-Station Assignment for the Downlink in CDMA Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 14, No. 1, February 2006.
- [22] M. Ismail and N. Aripin, "Downlink Soft Handover Performance for Different Cell Selections Schemes in WCDMA System". *IEEE* 2005 p.808-811
- [23] K. Navaie and H. Yanikomeroglu, "Downlink Joint Base-station Assignment and Packet Scheduling Algorithm for Cellular CDMA/TDMA Networks" *IEEE* 2006 pp. 4339-4344
- [24] K. Navaie and H. Yanikomeroglu, "Optimal Downlink Resource Allocation for Non-realtime Traffic in Cellular CDMA/TDMA Networks" *IEEE Comm. Letters*, Vol10, No. 4, April 2006
- [25] M. Shabany and K. Navaie, "Joint Pilot Adjustment and Base-Station Assignment for Data Traffic in Cellular CDMA Networks", *IEEE* 2004.
- [26] N. Feng, S. Mau, N.B. Mandayam, "Pricing and Power Control for Joint Network-Centric and User-Centric Radio Resource Management ", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 52, No. 9, September 2004
- [27] A. Bolle, H. Hertbertsson, "Backhaul must make room to HSDPA", *Wireless Europe*, Feb/Mar 2006.
- [28] J. Pérez-Romero, O. Sallent, R. Agustí, "Gestión de Recursos Radio en el Marco de los Sistemas 3G", *Documentos Proyecto Arrows*, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [29] H. Kellerer, U. Pferschky and D. Pisinger, "Knapsack Problems", Springer-Verlag, 2004
- [30] "How to Reduce Cellular Backhaul Transport Costs While Improving 2G and 3G Network Operating Efficiencies", *White Paper RAD Data Communications*, 2004.
- [31] G. Junowicz, "Cellular Backhaul: The Business Case for Packet-Based Radio Acces Network", *White Paper RAD Data Communications*, 2008
- [32] E. Schwartz, "Mobile Backhaul: Challenges & Opportunities", *White Paper RAD Data Communications*, 2008
- [33] R. Chundury, "Mobile broadband backhaul: Addressing the Challenge", *Ericsson Review* 3, 2008
- [34] "Cisco RAN Optimization Solution for GSM and UMTS Backhaul Optimization: Applications", *Cisco Systems*, 2007
- [35] "Alternative backhaul and data offload solutions for GSM and UMTS Operators", *Cisco Systems*, 2005
- [36] F. Ivanek, "Mobile Backhaul", *IEEE Microwave magazine*, From the Guest Editor's Desk, August 2009
- [37] S. Chia, M. Gasparroni and P. Brick, "The Next Challenge for Cellular Networks: Backhaul", *IEEE Microwave magazine*, August 2009

9 Acrónimos

3GPP	Third Generation Partnership Project
AC	Admission Control
AS	Active Set
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BA	Backhaul-aware
BB	Broadband
BLER	Block Error Rate
CAPEX	Capital Expenditure
CN	Core Network
CPICH	Common Pilot Channel
DL	Downlink
DSL	Digital Subscriber Line
EB	Estación Base
FDD	Frequency Division Duplex
GSM	Global System for Mobile Communications
GPRS	GSM Packet Radio System
HO	Handover
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
IMA	Inverse Multiplexing over ATM
IP	Internet Protocol
LC	Load Control
LTE	Long Term Evolution
ML	Multiplicadores de Lagrange
MMKP	Multidimensional Multiple-choice Knapsack Problem
MPL	Minimum Path Loss
MPLS	MultiProtocol Label Switching
OAM	Operation, Administration and Maintenance

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OPEX	Operational Expenditure
PBB-TE	Provider Backbone Bridge Traffic Engineering
PC	Power Control
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PS	Packet Scheduling
PSN	Packet Switched Network
QoS	Quality of Service
RAN Radio	Access Network
RB	Radio-based
RNC	Radio Network Controller
RNS	Radio Network System
RRM	Radio Resource Management
SA	Simulated Annealing
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SLA	Service Level Agreement
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TM	Terminal Móvil
T-MPLS	Transport MPLS
TNL	Transport Network Layer
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access