

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES



TESIS DOCTORAL

Contribución a la selección de acceso en redes inalámbricas heterogéneas

Autor: Johnny Choque Ollachica
Director: Ramón Agüero Calvo

Santander, junio de 2014

Certificado del director de la Tesis

D. Ramón Agüero Calvo, Profesor Contratado Doctor de la Universidad de Cantabria en el Área de Ingeniería Telemática

HACE CONSTAR:

Que la Tesis titulada “**Contribución a la selección de acceso en redes inalámbricas heterogéneas**” ha sido realizada por **D. Johnny Choque Ollachica** en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria bajo mi dirección, y que reúne las condiciones exigidas a los trabajos de doctorado.

Santander, junio de 2014

Fdo. Ramón Agüero Calvo

A Paula
Sé que llegarás mucho más lejos ...

Agradecimientos

Muchos años han pasado ansiando llegar a este punto de la Tesis y, como se suele decir en otras, es difícil expresar lo que se siente. Muchas cosas han sucedido, desde que inicie esta travesía. Muchas personas me han ayudado, de diversas formas, a que logre llegar a este momento. Muchas a quienes les debo más que un agradecimiento.

Empezaré por quien me dio la oportunidad de iniciar una nueva etapa de mi vida profesional. Gracias Luis Muñoz por depositar tu confianza en mí cuando con inmensa ilusión llegaba a España, para hacer realidad mis anhelos de ser investigador. Gracias por permitirme ser parte del GIT (Grupo de Ingeniería Telemática), que con tan acertado atino diriges. Gracias por alentarme abordar el tren del conocimiento, que me ha llevado a este momento. En su recorrido he logrado entender el verdadero significado de lo que habitualmente dices *solo sé que no sé nada*.

Si bien esta odisea lo empecé con gran convicción, el camino a seguir se hizo cada vez más largo y sinuoso. Gracias Ramón por encontrarme en medio de la nada. Gracias por enseñarme la salida del oscuro túnel con la luz de tus ideas. Gracias por compartir conmigo las mil y un batallas en este prolongado recorrido. Después del lastre que he sido, espero que aún continúe teniendo tu gran apoyo, intentaré no ser una carga tan pesada. Decirte gracias no refleja fielmente la dimensión de mi gratitud. Gracias por ser más que mi Director de Tesis. Gracias por ser mi amigo.

A los que conocí como profesores cuando inicié esta aventura: Klaus, Marta, Roberto, Jota, Alberto. Gracias por las tertulias en las horas del café, que muchas veces han logrado sacarme de la abstracción de mis pensamientos. Gracias por dejarme ser parte de vosotros a pesar de no ser *profe*. Gracias Marta por tu gran ayuda cuando realice el Master, sin ti no lo hubiera terminado. Gracias Jota por la alegría y el optimismo que siempre contagias. Roberto, Alberto, gracias por ser mis referentes para ansiar ser Doctor. Alberto, ya podré decir *llámame doc*. Klaus, gracias por estar pendiente de mis avances con la Tesis, gracias por creer que lo podía terminar.

Al inicio éramos tan pocos que entrábamos todos en un mismo despacho, ahora ya casi desbordamos dos laboratorios. Recuerdo que estábamos tres alrededor de un portátil, intentando con osadía modificar las entrañas del kernel de Linux. En aquellos tiempos hubiera sido más fácil hacer una mención para cada uno, ahora convertiría este apartado en otro capítulo de la Tesis. Son muchas aventuras vividas, innumerables anécdotas que contar, que han hecho de este grupo de personas algo más que excelentes profesionales. A Vero, José, Chus, Jorge, Luis, Pablo, David, Juanra, Nacho, Carmen, Laura, Javier y todos los demás, gracias por estar siempre dispuestos a echarme una mano, gracias por hacer que el día a día sea más llevadero con los eventos que nos hacen salir de la rutina. Gracias Luisco por los interesantes debates buscando el siguiente paso que podríamos dar. Gracias por perseguir la perfección en el enrevesado mundo del LaTeX, del cual este documento se ha visto beneficiado.

A todo aquellos que han pasado por la estación del GIT y han seguido su propio recorrido, todos hacia el éxito. César, Isabel, Paco, Chema, Paz, Rodrigo, Andrea, Ángel, y tantos otros que se me han quedado en el tintero. Gracias por compartir conmigo lo mejor de vosotros.

En este viaje siempre me ha acompañado mi familia. Mi incansable deseo de querer conocer el otro lado del mundo, de aprender de otras culturas, hizo que me alejara del lugar que me vio nacer y, por tanto, de mi familia. Ahora estamos juntos después de años sin estarlo. Mamita Paulina, gracias por estar siempre a mi lado, muchas veces en silencio, pendiente constantemente de que no me preocupe de nada. Gracias por haberte sacrificado tanto por nosotros, sin guardar nada para ti. Gracias por haber dedicado tu vida entera a enseñarnos ser buenas personas. Mamita no he llegado a la NASA como tanto anhelas, pero he intentado llegar lo más lejos posible. Papá Víctor, recuerdo las lágrimas que soltaste cuando ingrese a la UNI, lo orgulloso que te sentías, espero que con esta meta alcanzada el gozo sea mayor. A mis hermanos Julio, Alfredo, Isabel, gracias por seguir adelante a pesar de las adversidades, gracias por estar siempre pendiente de mamá. A mis cuñados Miguel y Delia, gracias por seguir caminando junto a mis hermanos, por motivar a que la familia se reúna. A mis otros cuñados, Jessica y Jesús, gracias por mantener la alegría y el optimismo a pesar de los infortunios de la vida. Gracias por estar siempre al lado de Giovanna cuando más os necesitaba. A mi suegra Elsa, gracias por intentar comprender mi manera de ser.

No podría olvidarme de mi numerosa familia que se encuentra en el Perú. A mis tíos Ignacio, Isidora, Dionicio, Mario, Dora, Juana, Ezequiel, Flora, gracias por compartir conmigo sus lecciones de la vida que me han ayudado a sacar fuerzas cuando por momentos desfallecía. Gracias a todos mis demás familiares que los tengo siempre presente a pesar de la distancia. Gracias Madrina Pascuala por esa fortaleza de espíritu que nunca podría alcanzar, pero que me ayuda a sentir que aún podría emprender nuevos retos.

A mi pequeña Paula, gracias por el inmenso amor que me brindas, por darme alegría cuando estoy sumido en la tristeza, por tus grandiosos besos que me dan fuerza, por esperar ansiosamente los fines de semana para *retozar* sin límites, por comprender que papá tenía que hacer *un trabajo importante*. Gracias por ser la razón de mi vida. Deysi, gracias por aquella sublime inocencia de pequeña que me motivó a formar una familia. Lamento no haber sabido hacerte entender cual era el camino correcto, pero lo intenté con ahínco.

Reza el refrán que *detrás de todo gran hombre hay una gran mujer*, en mi caso solo hay una gran mujer. Gracias Giovanna por hacer que tu camino se cruzara con el mío. Gracias por rescatar lo poco de bueno que tenía cuando me conociste. Gracias por darle sentido a mi vida, por tu confianza, tu comprensión, tu paciencia... Gracias por saber sobrellevar mi malhumor cuando sentía el agobio de la presión. Es demasiado lo que te debo y me sabe a poco lo que te he dado. Espero no desfallecer en mis intentos por convencerte que sigas a mi lado, porque junto a ti siento que puedo llegar aún más lejos. Una cosa sí es segura, seguiré luchando día a día por conseguir que seas completamente feliz...

Resumen

El acceso a Internet a través de redes móviles e inalámbricas ha experimentado en los últimos años un notable crecimiento, acompañado de un gran éxito comercial. Inicialmente se concibió como una manera de comercializar el exceso de capacidad que ofrecían las redes de tercera generación, o como una estrategia para proporcionar servicios de valor añadido; pero con el tiempo ha ocasionado una explosión inaudita en los volúmenes de tráfico. Algunas de las fuerzas catalizadoras que impulsan esos cambios en el comportamiento de la sociedad de la información son: la proliferación de los teléfonos inteligentes, el número cada vez mayor de tecnologías y redes de comunicación, el dinamismo de las redes sociales, la flexibilidad con la que nuevos servicios y contenidos se ponen a disposición de los usuarios, entre otros.

Para abordar esta situación, los organismos de estandarización han promovido la evolución de las tecnologías inalámbricas, definiendo los requisitos necesarios para constituir las redes de cuarta generación (4G). En base a ello, la industria ha impulsado principalmente el desarrollo de la tecnología LTE, aunque también otras alternativas, particularmente HSPA y Wi-Fi, seguirán evolucionando para satisfacer las crecientes necesidades del usuario. Sin embargo, el esfuerzo tecnológico se ha enfocado principalmente en proporcionar mayor velocidad y ancho de banda, dejando de lado otros requisitos importantes que forman parte la visión del 4G. Las redes no son capaces de responder de manera adecuada a las crecientes necesidades de la sociedad de la información, que aspira tener un acceso sin restricciones tecnológicas a los servicios, así como realizar el intercambio de información en *cualquier lugar, en cualquier momento, y hacia cualquier persona*. Esta es la visión principal de los futuros escenarios de redes inalámbricas, en lo que se viene a conocer como *Next Generation Wireless Networks*.

La piedra angular de todas las concepciones existentes de las futuras redes inalámbricas es la existencia de un entorno de red con múltiples alternativas de acceso, sin límites administrativos ni tecnológicos, en el que los usuarios tendrán la posibilidad de seleccionar la más apropiada para satisfacer los requisitos exigidos por una determinada aplicación. Esto permite incluso que se propongan nuevos modelos de negocio, en los que el usuario tendría la libertad de transitar entre los diferentes proveedores de servicio y operadores de red, seleccionando aquellas que ofrezcan las características más interesantes. Para llevar a cabo esta visión es necesario contar con mecanismos de selección de acceso que identifiquen en todo momento cuál es la red de acceso más adecuada para cubrir las expectativas tanto del usuario, y de los servicios que utiliza, como del operador de red.

La Tesis realiza una contribución a la problemática de la selección de acceso, proponiendo una metodología que permite analizar, desde una perspectiva global e integral, los diferentes escenarios que puedan presentarse en las futuras redes de comunicación inalámbricas. Para ello hace uso de dos enfoques diferentes, pero complementarios entre sí. El primero modela el proceso de selección de acceso desde la perspectiva del usuario, en base a los eventos que se producen en su contexto, proporcionando en todo momento la mejor alternativa de acceso. Aunque esto permite dotar al usuario con la mejor calidad de experiencia en sus comunicaciones, incluso estando en movilidad, no se puede asegurar si dicha solución contribuye a

alcanzar el rendimiento óptimo que se podría obtener en todo el sistema bajo estudio. Debido a ello se puede decir que este modelo tiene una naturaleza “local”, esto es, limitada al usuario, en tanto en cuanto éste no puede conocer las posibles consecuencias de su decisión sobre los demás usuarios o elementos de la red.

Con el objetivo de responder apropiadamente a la anterior incógnita, se propone un segundo modelo, que permite estudiar el mismo escenario mediante un análisis discreto en el tiempo, para establecer el límite superior del rendimiento que puede alcanzar el sistema, mediante el uso de técnicas de optimización. A diferencia del anterior, este enfoque no busca la mejor alternativa para un usuario específico, sino que se centra en el rendimiento óptimo de todo el sistema, por lo que se podría decir que este modelo hace uso de una perspectiva más “global”. Los resultados obtenidos al aplicarlo se utilizarán para determinar en qué medida el rendimiento de las estrategias analizadas con el enfoque anterior es mejorable, evitando las comparaciones con otros estudios con objetivos similares, pero claramente diferentes en los escenarios utilizados.

Ambas aproximaciones proponen un modelado que pretende reflejar las características más relevantes de los despliegues de red reales, mimetizando su comportamiento en la mayor medida posible, mediante entidades que emulan las propiedades y funcionalidades de los elementos correspondientes: estaciones base, operadores, usuarios, terminales, servicios, entre otros. Todos ellos constituyen el escenario sobre el cual se pueden realizar diversos análisis en función de un conjunto de parámetros, como las preferencias del usuario, características del servicio, o los requisitos provenientes de la red y de los operadores que la gestionan.

En base a los dos modelos propuestos, se realiza el diseño e implementación de sendas herramientas de simulación, correspondientes a cada uno de ellos. Se desarrollan entornos flexibles, escalables y de fácil configuración, con el objetivo de acometer la evaluación de los procesos de selección de acceso en entornos heterogéneos. A diferencia de otras plataformas similares, las herramientas de simulación que se describen en este documento permiten realizar despliegues de red altamente configurables, facilitando la tarea de reflejar la diversidad que caracterizará las redes inalámbricas en un futuro cercano.

Finalmente, se lleva a cabo la evaluación de un conjunto de escenarios, analizando diversas estrategias de selección de acceso, mediante las herramientas de simulación implementadas. En cada uno de ellos se plantean objetivos concretos, buscando en todo momento proporcionar la mejor alternativa de acceso para el usuario en entornos de red multi-acceso, multi-interfaz, multi-servicio y multi-operador.

Summary

Internet access by means of wireless and mobile networks has considerably grown in the latest years, together with to a remarkable commercial success. It was originally conceived as a means to exploit the capacity excess of by third generation wireless networks, or as a strategy to provide added value services. However, the recent proliferation of smart phones has brought about an outstanding increase of the data traffic volume. Some of the forces behind these new scenarios are the increase of the number, and their heterogeneity, of mobile devices connected to Internet, the broad range of requirements from the applications, the growing number of network technologies and deployments, operators that manage them, social network dynamism, and the flexibility with which new services and contents are offered to the end-users.

In order to appropriately tackle this situation, the standardization bodies have promoted the evolution of wireless technologies, identifying the requirements that need to be addressed so as to build the so-called 4th Generation Networks (4G). In this sense, the industry has mainly promoted the development of the LTE technology, although other alternatives, mostly Wi-Fi, have also received a notable attention. It is sensible assuming that they will continue to evolve so as to cope with the growing requirements of the end-users. However, the effort has been mainly focused on providing a higher capacity and bandwidth, leaving aside other relevant aspects that are as well within the 4G vision. As a consequence, current network deployments are not able to appropriately deal with the more stringent needs from the information society, which wishes to have access to services without technological bounds, being able to exchange information anywhere, anytime and to anyone. This is the main vision that is being foreseen in the forthcoming wireless communication scenarios, the so-called Next Generation Wireless Networks.

The main cornerstone of almost all conceptions of future wireless networks is the existence of an environment with multiple access alternatives, in which users would have the possibility to select the most appropriate one, considering the particular requirements of the application. This can even bring about new business models, since the end user would be able to seamlessly move between different service and network providers, selecting those offering the most interesting characteristics. In order to be able to leverage this vision, it becomes necessary having access selection mechanisms to always identify the most adequate access networks to cope with the requirements coming from both the user (and the services she is using) and the network operator.

This PhD contributes to the problem of access selection, proposing a methodology that allows the global and generic analysis of the various scenarios that can spring in the future wireless communication networking realm. For that, it fosters two different, yet complementary, approaches. The first one models the access selection process from the user perspective, based on the events that may happen within her environment, providing the best access alternative. Although this provides the user with the best quality of experience for her own communications, even when she is moving, it such solution cannot be said to contributes to

the global optimum behaviour (considering the whole system under analysis). We can therefore state that this model has a “local” character, i.e. focused on the end-user, since she could not be aware of the potential consequences of her decision over the remaining users or network elements.

In order to appropriately answer the aforementioned question, this PhD proposes a second model, which allows studying the very same scenario by means of a discrete-time analysis, to establish the upper performance limit that can be provided by the whole system, using optimization techniques. As opposed to the previous model, this approach does not seek the best alternative for a specific user, but it focuses on the overall system performance; it can be therefore said that this second model fosters a more “global” approach. The results that are obtained with this model will be used to determine whether the performances of the strategies studied by means of the previous approach might be improved or not, avoiding the comparison with other studies with the same objectives, but carried out over rather distinct scenarios.

Both approaches propose a model that aims at reflecting the most relevant characteristics of real network deployments, mimicking their behaviour as closely as possible, by using entities that emulate the properties and functionalities of the corresponding elements: base stations, operators, users, terminals, services, etc. All of them jointly create a scenario over which different analysis can be carried out, considering a number of different parameters, such as user preferences, service characteristics, or the requirements from the network and the operators managing it. Based on the proposed models, the PhD also tackles the design and implementation of two simulation tools. The corresponding frameworks are flexible, scalable and enable an easy configuration, to foster the analysis of multiple scenarios and access selection strategies. As opposed to other similar platforms, the two simulation tools that are described within this document allow the deployment of highly configurable network scenarios, mimicking the large heterogeneity of the forthcoming wireless networks.

Last, the PhD tackles the evaluation of a number of access selection strategies, exploiting the two aforementioned simulation platforms. Each of them would address particular objectives, aiming at offering the end-user with the best access alternative, considering multi-access, multi-interface, multi-service and multi-operator network scenarios.

Índice general

1. Introducción	3
1.1. Motivación	4
1.2. Objetivos	5
1.3. Organización de la Tesis	7
2. Antecedentes y Estado del Arte	11
2.1. Antecedentes de la investigación	11
2.2. Hacia los futuros escenarios de redes inalámbricas	13
2.3. Gestión de los recursos radio en NGWN	15
2.4. Selección de acceso en redes inalámbricas heterogéneas	17
2.4.1. Estructura general del proceso de selección de acceso	18
2.4.2. Estrategias para la toma de decisión	19
2.4.3. Herramientas matemáticas para el modelado de la selección de acceso	20
3. Arquitecturas de Referencia	23
3.1. Ambient Networks - Cooperación entre redes heterogéneas <i>Beyond 3G</i>	23
3.1.1. Ambient Control Space	24
3.1.2. Arquitectura de acceso multi-radio	25
3.2. SAIL - Las redes del futuro centradas en la información	29
3.2.1. Open Connectivity Services	31
3.2.2. Arquitectura OConS	31
3.3. mIO! - Soluciones de conectividad para futuros servicios ubicuos	34
3.3.1. Tecnologías de comunicación y conectividad	37
3.3.2. Gestor de Comunicaciones	37
4. Metodología de Análisis	41
4.1. Modelo orientado a la mejora local del sistema	41
4.1.1. Descripción del modelo mCASE	42
4.1.2. Estructura lógica del modelo	44
4.1.3. Proceso de selección de acceso	46
4.1.4. Modelado de las funciones de utilidad para mCASE	47
4.2. Modelo orientado a la optimización del sistema	50
4.2.1. Descripción del modelo oGASE	51
4.2.2. Modelado del servicio	55
4.2.3. Formulación del problema de optimización	57
4.2.4. Modelado de las funciones de utilidad para oGASE	58
5. Herramientas de Simulación	61
5.1. Estado del arte	61
5.2. mCASE	63
5.2.1. Principios de diseño	63
5.2.2. Eventos gestionados por mCASE	67
5.2.3. Implementación del proceso de solicitud de recursos	71
5.2.4. Implementación del proceso de selección de acceso	72

5.2.5. Funcionamiento del simulador mCASE	76
5.3. oGASE	80
5.3.1. Funcionamiento del simulador oGASE	82
5.3.2. Arquitectura software de oGASE	84
5.3.3. Módulo cliente: <i>Snapshot Optimizer</i>	85
5.3.4. Módulo servidor: <i>Monitoring System</i>	89
5.3.5. Protocolo de comunicación	95
6. Análisis de Escenarios de Selección de Acceso	97
6.1. Escenario MC-01	98
6.1.1. Descripción del escenario	98
6.1.2. Resultados de la simulación	100
6.1.3. Discusión	103
6.2. Escenario MC-02	104
6.2.1. Descripción del escenario	104
6.2.2. Resultados de la simulación	108
6.2.3. Discusión	110
6.3. Escenario OG-01	111
6.3.1. Descripción del escenario	112
6.3.2. Resultados de la simulación	114
6.3.3. Discusión	122
6.4. Escenario OG-02	122
6.4.1. Descripción del escenario	122
6.4.2. Resultados de la simulación	125
6.4.3. Discusión	128
6.5. Escenario final	130
6.5.1. Descripción del escenario	130
6.5.2. Resultados de la simulación	133
6.5.3. Discusión	141
7. Conclusiones y Líneas Futuras	143
7.1. Aportaciones	143
7.2. Líneas Futuras de Investigación	147
A. Publicaciones derivadas de la Tesis	149
A.1. Revistas internacionales	149
A.2. Revistas nacionales	149
A.3. Conferencias internacionales	150
A.4. Conferencias nacionales	152
Índice de Figuras	156
Índice de Tablas	157
Lista de acrónimos	159
Bibliografía	161

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día, las tecnologías de comunicación inalámbricas han llegado a formar parte integral de las tareas cotidianas de las personas, a tal punto que su uso siempre influye de alguna manera en sus vidas [Wireless Broadband Alliance, 2012]. Ante al amplio abanico de alternativas tecnológicas de comunicación (muchas de ellas embebidas en los emergentes *smartphones*) y la gran popularidad que han adquirido numerosos servicios con exigentes requisitos de ancho de banda (como el *streaming* de vídeo de *YouTube*), los usuarios consideran natural el hacer uso, en entornos inalámbricos, de los servicios pensados en un principio para ser soportados por las redes de comunicación fijas [Baldemair et al., 2013]. Los usuarios se preguntan si podrían cursar dichos servicios sin tener que pensar la tecnología inalámbrica a utilizar en cada momento, pero ante eso se presentan diversas fronteras que no les permiten lograr ese anhelo. Los límites tecnológicos hacen que un usuario que utiliza habitualmente, por ejemplo, 4G, se pregunte *porqué tiene que estar pendiente de activar la Wi-Fi cuando llega a casa mientras está viendo su vídeo favorito*. Las fronteras administrativas o de negocio hacen que usuarios utilizando el mismo *smartphone*, pero siendo clientes de distintos operadores, se pregunten *porqué tienen que resignarse a utilizar una conexión inalámbrica de baja calidad, cuando el otro usuario, junto a él, disfruta de uno mucho mejor*. Las fronteras de conectividad hacen que un usuario no pueda aprovechar la conexión de otro, que no tenga una limitación de ancho de banda *¿papá, por qué tengo que usar el móvil de mamá cuando se termina el Internet en el tuyo?*

Las futuras redes inalámbricas presentan visiones que rompen con esas y otras fronteras, postulando una red integrada y global capaz de ofrecer una solución donde los servicios puedan ser accedidos de forma transparente por los usuarios *“en cualquier momento y en cualquier lugar”*. Pero para llegar a ellas es necesario afrontar numerosos retos en diversas áreas como el encaminamiento, gestión de la movilidad, seguridad, gestión de recursos, modelos de negocio, etc. Dentro de la gestión de recursos se encuentran los procesos de selección de acceso que, considerando la gran heterogeneidad de tecnologías inalámbricas presente en los escenarios actuales y venideros, adoptan un papel relevante a la hora de proporcionar al usuario la mejor experiencia de conectividad que puede alcanzar en todo momento. En este punto es donde se enmarca la contribución de la Tesis, abordando metodologías que permitan analizar diversos algoritmos de selección de acceso para las futuras redes de comunicación inalámbricas desde dos perspectivas complementarias, pero fundamentales a la hora de determinar el comportamiento real del algoritmo de selección, en comparación con un nivel óptimo.

1.1. Motivación

A finales del 2013, el número de abonados de telefonía móvil a nivel mundial era de 4.5 billones, llegando el número de suscripciones hasta los 6.7 billones, ya que muchos abonados tienen varios contratos a su nombre. Estas cifras muestran un dato relevante, y es que la telefonía móvil presenta una tasa de penetración del 92 % de la población mundial. Desde el punto de vista de la tecnología móvil utilizada, en la actualidad GSM/EDGE representa el mayor porcentaje de las suscripciones móviles, aunque en los mercados más desarrollados se ha producido una rápida migración a tecnologías más avanzadas, lo que resulta en una disminución de la presencia de GSM/EDGE. Para el 2019, se prevé alcanzar los 9.3 billones de suscripciones móviles a nivel mundial, de los cuales, dentro de las tecnologías más relevantes, el 52 % serán WCDMA/HSPA, LTE representará el 28 %, mientras que GSM/EDGE disminuirá su presencia hasta el 13 % [Ericsson Consumer Lab, 2013]. Con respecto a las redes Wi-Fi, se puede decir que se presentan como una tecnología complementaria, pero relevante para los usuarios. Su gran ancho de banda y mejor cobertura en interiores, incrementa en gran medida la experiencia del usuario, mientras que su bajo coste reduce los gastos derivados de la descarga de grandes volúmenes de información. Para los operadores móviles, Wi-Fi ha pasado de ser una amenaza (una ventaja competitiva de las compañías de telefonía fija) a una oportunidad, para poder satisfacer las demandas de sus clientes con una alta calidad, pero de forma rentable. Debido a ello se observa un notable incremento en el despliegue de *hotspots*, con previsiones que estiman que el parque total instalado para el 2018 será de 10 millones, cursando un tráfico de datos que contribuirá en un 20 % a la capacidad de las redes móviles [Wireless Broadband Alliance, 2013].

Por otra parte, con respecto a los dispositivos que el usuario utiliza para acceder a la red de telefonía móvil, también existe un abanico de opciones que se puede categorizar en tres grandes grupos: teléfonos básicos, inteligentes, y equipos portátiles (*tablet*, *laptop*, etc.). El tradicional teléfono básico se creó, principalmente, para realizar llamadas telefónicas y enviar mensajes de texto. La evolución natural de éstos son los teléfonos inteligentes (*smartphones*), con capacidades de conectividad y procesado más avanzadas, convirtiéndolo en un mini ordenador. Actualmente, la mayoría de las suscripciones móviles hacen uso de teléfonos básicos, aunque esta tendencia se invertirá en un futuro cercano. Se espera que para el 2019, el número de teléfonos básicos represente el 30 % del total de dispositivos utilizados a nivel global, mientras que el 60 % serán *smartphones*, correspondiendo el 10 % restante a los dispositivos portátiles.

Con respecto al tráfico global cursado a través de las redes de telefonía móvil, en los últimos años se ha experimentado un crecimiento exponencial en el tráfico de datos, llegando a representar el 90 %, mientras que el tráfico de voz, para el que originalmente se creó la red de telefonía, no ha tenido, paradójicamente, ningún crecimiento relevante, manteniéndose alrededor del 10 %. Del tráfico global de datos, el servicio con un mayor crecimiento es el vídeo, llegando a representar, a finales del 2013, el 35 % del tráfico móvil global, esperándose que aumente hasta el 55 % para el 2019. El despliegue de redes HSPA y LTE, que proporcionan mayores velocidades de transmisión, junto con el incremento de los servicios de *streaming* bajo demanda y contenido en diferido, incluyendo *YouTube*, han contribuido al crecimiento del tráfico de datos. Por el contrario, la navegación *web* y las redes sociales solo constituyen, cada uno, alrededor del 10 % del total del tráfico de datos móviles, y se prevé que dicha cuota se mantendrá en el mismo nivel en el 2019.

El panorama tecnológico descrito prevé que el futuro inmediato de las comunicaciones inalámbricas se caracterizará por un abanico de tecnologías de acceso (*Radio Access Technologies*, RAT), gestionadas por un número relativamente grande de operadores, lo que permi-

tirá al usuario utilizar una amplia gama de aplicaciones, con diferentes calidades de servicio (*Quality of Service*, QoS) y niveles de precios. Esta situación, junto con la proliferación de dispositivos y *gadgets* equipados con diferentes tecnologías inalámbricas, trae consigo nuevos retos y oportunidades. Entre ellos, se considera necesaria la existencia de novedosos algoritmos de selección de acceso que, de forma automática, garanticen la mejor alternativa de conexión para el usuario, teniendo en cuenta diversos aspectos, tales como sus preferencias, la condición particular de la red, así como los requisitos puntuales de los servicios. Hoy en día, dichos procedimientos de selección de acceso se basan principalmente en procesos no automatizados, lo que requiere, en muchos casos, la intervención directa del usuario, por lo que se hace necesario volver a revisarlos.

Desde el punto de vista de los operadores, también se necesitan estrategias novedosas que permitan optimizar el uso de la infraestructura desplegada, no solo en las situaciones de congestión, sino también cuando la demanda se encuentra en niveles bajos, con el principal objetivo de maximizar los ingresos, mientras que se mantienen los niveles de calidad de servicio con los usuarios.

Un aspecto importante dentro de los algoritmos de selección de acceso es la elección idónea de los criterios utilizados para determinar el acceso más adecuado. A pesar del esfuerzo puesto por la comunidad científica en algunos criterios, la mayor parte de los trabajos se centran en utilizar aspectos relacionados con el comportamiento físico de la red. En este sentido, es necesario analizar otros parámetros, como por ejemplo el precio, que también podría jugar un papel fundamental en determinar el nivel de satisfacción del usuario cuando hace uso de un servicio. Además, este tipo de criterio es también importante desde el punto de vista de los operadores, permitiéndoles definir estrategias que deriven en un incremento de sus beneficios.

Para superar los retos que presentan estos nuevos escenarios, es necesario que las entidades de red involucradas (estaciones base, usuarios, operadores, etc.) cooperen entre ellas, por medio de mecanismos de señalización novedosos que permitan el transporte de la información de control necesaria. Esta información tendría, obviamente, un alcance limitado al usuario, ya que éste no podría ser consciente de las posibles consecuencias que su decisión puede acarrear sobre el resto de nodos de la red. Además, con el fin de establecer la idoneidad de los mecanismos de acceso utilizados, sería fundamental conocer cuál es el mejor rendimiento que puede alcanzar el sistema. Esto permitiría determinar cuán cerca se encuentra el comportamiento obtenido por el proceso de selección de acceso, del nivel óptimo que puede ofrecer el sistema en su conjunto.

1.2. Objetivos

Si bien la comunidad científica ha estudiado en profundidad diversos aspectos relacionados con los procesos de selección de acceso de las futuras redes de comunicación inalámbricas, muchos de ellos se han realizado en base a un reducido número de elementos de red, sin lograr reflejar en gran medida la notable heterogeneidad de los escenarios correspondientes. Utilizan un modelado con rígidas estructuras que no permiten acometer un análisis más amplio, o basan sus conclusiones en la comparación de sus resultados con otros estudios con objetivos similares, pero fundamentalmente diferentes en los escenarios utilizados. El panorama descrito anteriormente pone de manifiesto la necesidad de considerar la diversidad existente en los despliegues de redes inalámbricas, así como adoptar un entorno de análisis, lo suficientemente flexible, que permita evaluar los algoritmos de selección de acceso desde

una perspectiva integral, comparando su rendimiento con el nivel óptimo que pueda alcanzar el sistema.

Considerando las premisas mencionadas, los desarrollos llevados a cabo en el marco de la Tesis se articulan principalmente sobre una metodología de análisis basada en dos modelos con enfoques diferentes pero complementarios entre sí.

El primero pretende acometer el análisis desde la perspectiva del usuario, por lo que tiene en cuenta todos los eventos que puedan producirse en el contexto en el que se encuentra. Así, un usuario puede, en un determinado momento, tener a su alcance diferentes alternativas de acceso, y estar haciendo uso de varios servicios con diversos requisitos de calidad. El modelo recoge, mediante determinados elementos, todas las características del escenario que rodea al usuario, analizándolas para determinar la mejor alternativa de acceso que se puede ofrecer a cada servicio en función de diversos parámetros, como las preferencias del usuario, características del servicio, o los requisitos propios de la red y de los operadores que la gestionan. Aunque así se podría proporcionar al usuario la mejor calidad de experiencia en sus comunicaciones, incluso estando en movilidad, no se puede determinar si dicha solución contribuye a que todo el sistema bajo estudio logre acercarse al rendimiento óptimo que se podría obtener. Por ello se puede decir que este modelo tiene una naturaleza “local”, esto es, limitada al usuario, en tanto en cuanto éste no podrá conocer las posibles consecuencias de su decisión sobre los demás elementos de la red.

El segundo modelo complementa los resultados que se obtienen con el anterior; para ello busca establecer el límite superior del rendimiento que puede alcanzar el sistema. Con ese fin, replica el escenario usado por el primer modelo, es decir, hace uso de las mismas entidades (usuarios, estaciones base, operadores, etc.), así como también de los mismos patrones de tráfico, generados por los servicios, y de movimiento por parte de los usuarios. Posteriormente, realiza un análisis en instantes temporales discretos, evaluando en ellos el rendimiento óptimo que puede ofrecer el sistema mediante el uso de técnicas de optimización. Podría darse el caso, por ejemplo, que un usuario, habiendo estado conectado previamente, no pueda mantener dicha conexión activa, a pesar de que se dieran las condiciones para que así fuera. Esta situación se puede presentar debido a que en este modelo no se busca, como en el anterior, la mejor alternativa de acceso para un usuario específico, sino el rendimiento óptimo para todo el sistema, por lo que se podría decir que plantea un enfoque más “global”.

Para llevar a cabo el desarrollo de ambos modelos, siguiendo la metodología de análisis que los armoniza, se han planteado dentro de esta Tesis una serie de objetivos más específicos, que se describen a continuación.

- Especificar un modelo de análisis orientado a determinar la mejor alternativa de acceso para el usuario, en base a los requisitos provenientes de la red, los servicios y sus propias preferencias. Debe incluir entidades que permitan mimetizar la heterogeneidad de los escenarios, tanto desde el punto de vista de las tecnologías de acceso, como de los servicios, operadores, usuarios y terminales, entre otros. Debe proporcionar una estructura lógica que permita incluir fácilmente diversos criterios de selección de acceso que serán utilizados durante el análisis.
- Especificar un modelo de análisis orientado a la optimización global del sistema. Debe adoptar los principios básicos del anterior, de manera que pueda acometer un análisis en base al mismo escenario. Sería razonable que presentara una estructura lógica que le permita abordar adecuadamente los numerosos procesos de optimización que se llevarán a cabo, así como garantizar la modularidad necesaria para independizar el desarrollo de cualquier *software* de optimización.

- Diseñar, implementar y validar una herramienta de simulación en base al primer modelo, incorporando los módulos de abstracción necesarios para reducir la carga computacional de los procesos de simulación, permitiendo incluir un mayor número de entidades de red, de diferentes tipos, que reflejen adecuadamente entornos altamente heterogéneos. Además, ofrecería la posibilidad de enfocar los esfuerzos de diseño en tareas claramente relacionadas con los procedimientos de selección de acceso.
- Diseñar, implementar y validar una herramienta de simulación en base al segundo modelo, que gestione adecuadamente las intensas tareas de simulación, permitiendo distribuir sus principales procesos sobre recursos computacionales que pudieran estar alojados en diversas máquinas.
- Evaluar las herramientas de simulación implementadas sobre diversos escenarios que reflejen las principales características de las redes inalámbricas heterogéneas. Se debe seleccionar un conjunto de casos de uso en los que aplicar las herramientas por separado, demostrando que se pueden utilizar de manera independiente, así como de forma conjunta, verificando que fueron concebidas para ser complementarias.

1.3. Organización de la Tesis

Para afrontar adecuadamente los objetivos mencionados en el apartado anterior, durante la Tesis se han dado una serie de pasos descritos en esta memoria, según la estructura que se describe a continuación.

- El **Capítulo 2** empieza describiendo la trayectoria de la investigación que se ha realizado hasta la culminación de este trabajo, puntualizando en los estudios que se han llevado a cabo en diversos proyectos de investigación que han contribuido a conformar el marco de la Tesis. Gracias a dichas contribuciones, se han establecido algunos de los requerimientos fundamentales que exige la futura generación de sistemas inalámbricos, cuyo estado del arte, en lo referente a la gestión de recursos radio, también se analiza en este capítulo, para establecer el fundamento teórico sobre el que sustentan las aportaciones de la Tesis. El capítulo concluye haciendo una descripción de las herramientas matemáticas más relevantes que se utilizan a la hora de analizar el comportamiento de los algoritmos de selección de acceso.
- Dentro de los proyectos de investigación descritos en el capítulo anterior, hay algunos que destacan por su importancia, ya que en ellos se han realizado trabajos directamente relacionados con el desarrollo de la Tesis. El **Capítulo 3** describe las arquitecturas y funcionalidades de tres de ellos, que han servido de referencia a la hora de acometer el modelado de las herramientas de simulación. Se describen las características más importantes de dichos proyectos, sobre todo en lo relacionado con la gestión de recursos radio y, en particular, con los procesos de selección de acceso.
- Sentadas las bases teóricas y los marcos de referencia de la Tesis, el **Capítulo 4** describe la metodología a seguir durante el análisis de las redes inalámbricas heterogéneas. Para ello, se proponen dos modelos conceptualmente diferentes, pero complementarios a la hora de acometer un análisis integral. El primero de ellos, denominado mCASE, analiza el proceso de selección de acceso desde la perspectiva del usuario, con un planteamiento más cercano a la realidad, basándose en los eventos que se producen en el contexto

del usuario, particularmente aquellos que estén relacionados con la conectividad de su terminal, tratando de garantizar en todo momento la mejor alternativa de acceso. Evidentemente, la decisión que se adopte no necesariamente deriva en un rendimiento global óptimo del sistema. Por ello, en este capítulo también se describe un segundo modelo, llamado oGASE, que busca determinar el límite superior del rendimiento que podría alcanzar el sistema, por lo que no necesariamente proporciona a cada usuario la mejor alternativa de acceso posible, ya que su objetivo es buscar el rendimiento óptimo para todo el sistema.

En el caso de mCASE, se describe su estructura modular en sus diferentes fases: despliegue de usuarios y elementos de acceso, creación de los patrones de movimiento y servicio, y proceso de selección de acceso. Dentro de esta última, se integra el algoritmo que permite determinar la mejor alternativa de acceso, basado fundamentalmente en la teoría de la utilidad, que hace uso de diversos criterios para asignar una calificación a cada alternativa de acceso involucrada en el proceso de selección. También se describen las funciones de utilidad de los criterios considerados más relevantes para el análisis de los entornos de redes inalámbricas heterogéneas.

De forma similar, en el caso de oGASE se describe el modelo haciendo uso de tres conceptos fundamentales: fotografía, par usuario-servicio e intención del usuario. Su diseño se sustenta sobre dos pilares principales. El primero de ellos se encarga de llevar a cabo la optimización de cada una de las fotografías que constituyen el escenario bajo análisis; el segundo, por su parte, gestiona todos los eventos que se van produciendo en la red, para almacenar datos estadísticos sobre la estrategia concreta que se esté analizando, sirviendo de apoyo al anterior. También se describe el modelado del servicio a utilizar y la formulación del problema de optimización, que hace uso de diversos criterios para modular la variable básica de optimización, a partir de un conjunto de funciones de utilidad que también se describen en este capítulo.

- En base a los modelos descritos en el capítulo anterior, en el **Capítulo 5** se detallan los aspectos relacionados con sus respectivas implementaciones en herramientas de simulación. Se pretende desarrollar entornos flexibles, escalables y de fácil configuración, con el objetivo de poder acometer la evaluación de diversos escenarios de selección de acceso. A diferencia de otras plataformas similares, las herramientas de simulación que se presentan permiten simular escenarios complejos sin incrementar, de manera notable, la carga computacional.

Para mCASE se especifican, en primer lugar, los principios de diseño sobre los que se fundamenta la herramienta, relacionados con el modelado del tráfico de los servicios y los movimientos de los usuarios, así como con la abstracción de la propagación radio, y la capacidad y coste de los servicios. Por otra parte, para tener en cuenta todos los sucesos que se producen en el contexto de un usuario, mCASE hace uso de la simulación por eventos, por lo que en este capítulo también se enumeran aquellos que son gestionados. Seguidamente, se describen los detalles de la implementación de los procedimientos más relevantes, por ejemplo, el relacionado con la petición de los recursos y la selección de acceso. El capítulo finaliza detallando el funcionamiento general de la herramienta, poniendo de manifiesto la facilidad para configurar complejos escenarios de redes heterogéneas.

Con respecto al simulador oGASE, se empieza describiendo su funcionamiento y la relación que mantiene con mCASE, que le sirve como base para acometer determinados

análisis sobre el mismo escenario. Se presenta la arquitectura software de la herramienta, basada en dos módulos que siguen la filosofía cliente-servidor. Para ambos se describen las clases que los componen, las funcionalidades de cada una de ellas, y las interacciones que se llevan a cabo durante los procesos de optimización de las fotografías. Para el módulo servidor se describe, principalmente, la manera en la que se gestionan los estados de los servicios y cómo se ha planteado el sistema que obtiene las estadísticas. Por su parte, para el lado cliente, se plasman los procedimientos que realizan el análisis del escenario, y que permiten obtener los datos necesarios para llevar a cabo el proceso de optimización; también incorpora las rutinas necesarias para implementar el problema y realizar su resolución mediante técnicas de programación lineal, proporcionadas por la herramienta GLPK. Finalmente, se detalla el protocolo que permite el intercambio de información entre el servidor y las instancias del cliente, que podrían ser ejecutadas en máquinas diferentes.

- En el **Capítulo 6** se describen los resultados obtenidos al aplicar las herramientas de simulación sobre escenarios que reflejan las características más relevantes de las redes inalámbricas heterogéneas. Para ello se propone un conjunto de escenarios sobre los que se emplean ambas implementaciones de manera independiente, validándose su aplicabilidad y obteniéndose resultados orientados a los objetivos bajo los cuales fueron diseñadas. Teniendo en cuenta que las dos herramientas fueron concebidas bajo una metodología que propone su uso de forma conjunta, se plantea un escenario final, sobre el que se busca la mejor alternativa de acceso para el usuario en base al enfoque local que potencia mCASE y, a su vez, se analiza cuán cerca se encuentra el rendimiento obtenido del valor óptimo, proporcionado mediante la aproximación global que ofrece oGASE.
- Finalmente, en el **Capítulo 7** se exponen las principales conclusiones a las que se han llegado durante el desarrollo de la Tesis, las principales aportaciones de la misma, y las líneas de investigación que se han abierto como consecuencia del trabajo llevado a cabo.

Antecedentes y Estado del Arte

La gestión de recursos radioeléctricos es una tarea muy compleja, sobre todo cuando se consideran escenarios heterogéneos, en donde conviven diversas soluciones tecnológicas. Aunque de forma nativa los recursos radio se refieren al nivel más bajo del modelo de referencia OSI (capa física), éstos pueden ser gestionados mediante el uso de diversos esquemas pertenecientes al resto de capas. Durante la trayectoria de investigación que ha culminado en la presente Tesis, se han realizado diversos estudios y desarrollos que han permitido analizar el impacto del acceso a los recursos inalámbricos por parte de los usuarios y los servicios, desde diferentes perspectivas de la pila de protocolos. En este capítulo se describen los diferentes estadios de la investigación a lo largo de los que ha ido evolucionado el concepto de gestión de recursos radio, lo que ha supuesto finalmente la aportación fundamental de la Tesis.

La gestión de recursos radio se desarrolla dentro de un amplio marco teórico, cuyo estado del arte se describe en este capítulo, para servir como referencia a las contribuciones descritas a lo largo del documento. En este sentido se describen las características de los futuros escenarios de redes inalámbricas, la evolución en los conceptos de gestión que se deben realizar para hacer frente a los requisitos de dichos escenarios, y las nuevas estrategias que se deben adoptar dentro de los procesos de selección de red para cubrir las expectativas de todas las entidades involucradas en tales procesos.

2.1. Antecedentes de la investigación

Uno de los primeros estudios que se realizó fue la asignación de recursos radio para servicios multimedia de banda ancha (voz, vídeo y datos), siguiendo una estrategia similar a la especificada por la tecnología ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Se analizó el rendimiento de dos de los esquemas de acceso más relevantes en su momento, el propuesto por Raychaudhuri (MDR-TDMA) en [Raychaudhuri y Wilson, 1994], y el esquema basado en *token ring* descrito por Acampora en [Acampora y Krishnamurthy, 1997]. En base a esos estudios se propuso el protocolo de control de acceso al medio (MAC) **P-DTDMA** (*Polling Dynamic Time Division Multiple Access*) [Muñoz et al., 1999a, Muñoz et al., 1999b], que, combinando las ventajas de los dos esquemas anteriores, logró obtener mejores prestaciones que sus antecesores.

Posteriormente, aprovechando el marco de referencia que ofrecía el proyecto europeo **WINE** (*Wireless Internet Network*) [Mähönen et al., 2001], se dio un salto dentro del modelo OSI (ver Figura 2.1), nivel superior de la capa de enlace de datos (LLC), con el fin de estudiar el escaso rendimiento que presentaba el canal inalámbrico en entornos de in-

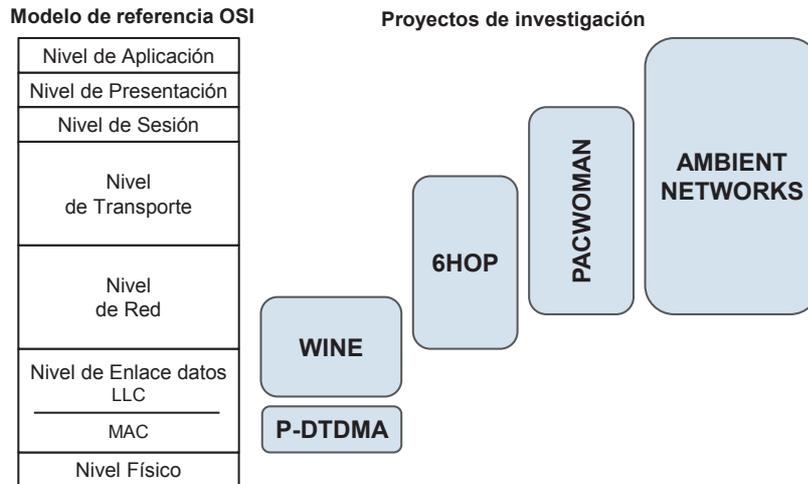


Figura 2.1: Evolución de los antecedentes de la investigación

teriores. Para ello se realizó una caracterización del comportamiento de los protocolos TCP [Agüero et al., 2003c] y UDP [Agüero et al., 2001, Muñoz et al., 2001a] sobre la tecnología de red de área local inalámbrica IEEE 802.11b. Se hizo uso de una plataforma de pruebas experimental que permitió determinar la influencia real de las imperfecciones del canal inalámbrico y la inestable e impredecible calidad del enlace sobre el rendimiento de la red. Se propuso una entidad intermedia, denominada WAL (*Wireless Adaptation Layer*) [Choque et al., 2001], entre la capa de enlace de datos y la de red, con el fin de alojar una serie de módulos que implementaban diversos mecanismos que permitían compensar la deficiente calidad de los enlaces inalámbricos, de manera transparente para las capas superiores, los cuales percibían un medio de transporte eficiente y fiable. Entre los módulos implementados dentro de la WAL uno de los más relevantes fue el denominado FECM (*Forward Error Control Enhancement Module*) [Muñoz et al., 2001b, Agüero et al., 2003a], que, basado en una entidad FEC (Forward Error Correction), conseguía corregir un porcentaje importante de paquetes erróneos que llegan al receptor, lo que incrementaba el rendimiento extremo a extremo. Otro módulo que se implementó, y que únicamente se podía emplear para tráfico TCP, es el denominado *Snoop* [García et al., 2002], el cual realiza retransmisiones locales (no extremo a extremo) de segmentos TCP para evitar la actuación del mecanismo de congestión de TCP debido a errores producidos por el canal inalámbrico. De esta forma se reducen los largos periodos de inactividad que originaban el bajo rendimiento de TCP cuando el canal inalámbrico se caracteriza por una mala calidad de señal.

El proyecto WINE tenía como escenario de estudio el último salto hacia el terminal del usuario, constituido básicamente por un enlace inalámbrico IEEE 802.11b. Para extender dicho estudio se amplió el escenario hacia un entorno multisalto, posibilitando que el terminal móvil del usuario no esté limitado a estar dentro de la cobertura de un punto de acceso fijo [Agüero et al., 2005b, Agüero et al., 2005c]. En este sentido bajo el marco del proyecto europeo **6HOP** (*Protocols for Heterogeneous Multi-Hop Wireless IPv6 Networks*) se definió una arquitectura que permitía optimizar la pila TCP/IP sobre redes multisalto heterogéneas. En relación con el proyecto WINE, además de considerar los mecanismos que permitían la compensación del canal radio y la especificación de una interfaz inalámbrica uniforme, se consideraron el consumo de energía, el soporte nativo de IPv6, la seguridad y la optimización intercapa, todo bajo un entorno multisalto. En [Sanz et al., 2003] se describe las caracterís-

ticas de esa nueva propuesta, introduciendo el concepto de WAF (*Wireless Adaptation Framework*). Este se presenta como un conjunto de mecanismos que permite conocer el contexto del nodo móvil, con el fin de llevar a cabo la optimización intercapa, logrando que diferentes elementos de información, procedentes principalmente de la capa física, puedan ser utilizadas por entidades de las capas superiores para realizar una mejor gestión de los recursos. Al contrario de la capa WAL definida en WINE, el diseño de la WAF se extiende a múltiples capas de la pila de protocolos, desde el nivel de enlace hasta el de transporte [Agüero et al., 2004c], lo que permite llevar a cabo el paradigma de la optimización intercapa.

De forma paralela, un concepto similar al de 6HOP, pero con los requerimientos de otro tipo de escenarios, se estudió dentro del proyecto europeo **PACWOMAN** (*Power Aware Communications for Wireless OptiMised personal Area Networks*) [Muñoz et al., 2004]. Este proyecto incluye, dentro de su línea de investigación principal, las infraestructuras de comunicación de corto alcance que pueden desplegarse en el área de la persona, también conocidas como WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Además de considerar los mecanismos que permiten mejorar el encaminamiento multisalto [Agüero et al., 2003b], y los algoritmos que incrementan el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas en condiciones desfavorables del canal radio, dentro de PACWOMAN se considera la heterogeneidad de los dispositivos, desde los que tienen capacidades reducidas, como los sensores, hasta los de mayor capacidad. Debido a ello se adopta una estrategia de bajo coste computacional basada en una arquitectura jerárquica y escalable que define tres niveles de red: un dispositivo virtual, constituido por una pequeña red de terminales básicos; una red de área personal PAN, constituida por dispositivos virtuales y terminales más avanzados; y finalmente una red de mayor alcance denominada CAN (*Community Area Network*), constituida por varios PAN que se comunican a través de una topología mallada, y que pueden establecer comunicación con el mundo exterior a través de un gateway. Siguiendo una filosofía similar a la de anteriores proyectos de investigación, se diseña una capa de optimización denominada PCOL (*PAN/CAN Optimization Layer*) [Irastorza et al., 2003], que se sitúa entre la capa IP y la infraestructura de red subyacente, y que aloja todas las funcionalidades relacionadas con el contexto y las preferencias del usuario, los mecanismos de encaminamiento multisalto y los aspectos de gestión de potencia durante las comunicaciones.

En base al trabajo llevado a cabo en los anteriores proyectos de investigación, se pueden establecer algunos de los requerimientos que exigen la futura generación de sistemas inalámbricos, bosquejando una visión de lo que podrían ser las redes de cuarta generación (4G). Para satisfacerlos en [Agüero et al., 2004b, Agüero et al., 2004a] se propone una arquitectura que se fundamenta en un nuevo paradigma centrado en el usuario, donde cada persona se siente y actúa como si fuera el “señor” de la red y la tecnología aparece embebida en el ambiente, actuando como un “sirviente”. Precisamente esta visión constituye una de las principales líneas de investigación de los proyectos europeos que formaron parte del marco fundamental de la Tesis, *Ambient Networks* y *Scalable & Adaptive Internet soLutions (SAIL)*, que se describe con más detalle en el Capítulo 3.

2.2. Hacia los futuros escenarios de redes inalámbricas

Los sistemas inalámbricos son una de las tecnologías que han sufrido una evolución vertiginosa en las últimas décadas. Recientemente han surgido nuevas tecnologías, como IEEE 802.11ac [Van Nee, 2011], que establece capacidades de hasta gigabits por segundo desde un único punto de acceso, o LTE [Jimaa et al., 2011], que está acortando el camino hacia la

banda ancha móvil, permitiendo las comunicaciones directas entre dispositivos y la reutilización inteligente del espectro para aliviar la escasez del ancho de banda. Sin embargo no todo se reduce a diseñar redes de acceso con más ancho de banda y capacidad en los futuros escenarios de redes inalámbricas. Existe en la actualidad un profundo cambio en el núcleo de la red y, aún más importante, en las aplicaciones y los terminales móviles del usuario. Esta evolución sigue la tendencia que ya existe en las redes fijas. La telefonía de voz por circuitos conmutados está siendo reemplazada por tecnologías de VoIP (Voice over IP), y la Web 2.0 ha permitido a los consumidores ser creadores de nuevas formas de comunicación a través de las redes sociales. Junto con ello, hay que destacar la evolución de los terminales móviles hacia dispositivos más avanzados, que incluyen capacidades de imagen y vídeo, así como varias tecnologías de acceso inalámbricas, lo que los convierte en una herramienta ideal para crear y consumir contenido, siendo un fenómeno de gran impacto en los futuros escenarios de redes inalámbricas.

A los nuevos escenarios generados a partir de esta evolución de tecnologías y servicios se les conoce como *Next Generation Wireless Networks* (NGWN). En este concepto se engloban visiones con un alcance más amplio de los que generalmente se incluyen a la hora de describir términos tales como *Beyond 3G* (B3G) [Gonzalvez, 2006], *IMT-Advanced* [Hashimoto et al., 2008] o redes de Cuarta Generación (4G) [Varshney, 2012], los que se concentran principalmente en lograr una mayor capacidad. En la literatura existen diferentes definiciones de NGWN que intentan establecer las características de las futuras redes inalámbricas. En [Frattasi et al., 2006] se realiza una definición pragmática, en base a una metodología centrada en el usuario, que se convierte en la piedra angular del diseño, describiendo escenarios que implícitamente revelan las principales características de las NGWN. Por otra parte en [Sun et al., 2001] se describe, desde una perspectiva técnica, una visión centrada en la integración de tres componentes claves: el terminal, la red, y las aplicaciones, planteando diferentes aspectos de adaptabilidad de cada uno de ellos en función de los requisitos propios del usuario.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede afirmar que los grandes avances en tecnologías inalámbricas serían insuficientes para definir completamente los futuros escenarios NGWN. Para ello será también necesario tener en cuenta una perspectiva centrada en el usuario, y una visión de los mecanismos necesarios para facilitar el acceso universal al amplio abanico de aplicaciones y servicios. En este sentido los siguientes puntos extienden las perspectivas expuestas en la literatura y resumen las principales características que se espera tengan las NGWN:

- **Red constituida por diversas tecnologías de acceso.** No solo debería estar caracterizada por una diversidad numérica, sino también tecnológica, integrando en una red común tecnologías de características antagónicas, desde las redes de sensores, redes de área personal y local, hasta las redes móviles celulares.
- **Una arquitectura integrada y global.** Posiblemente basada en IP, aunque también se están presentando paradigmas revolucionarios que proponen un cambio de pensamiento en como abordar dicha arquitectura. Esto también implica que las comunicaciones deberían ser completamente digitales con un soporte que garantice la calidad de servicio extremo-a-extremo.
- **El sistema subyacente debería ser altamente autónomo.** La estructura de red debería tener una gran capacidad de adaptación y auto-gestión, para satisfacer las cambiantes y crecientes demandas de los usuarios.

- **Soporte de un acceso universal por parte del usuario.** La red debería garantizar, no solo el acceso, sino también la itinerancia transparente y continua entre redes de diferentes RAT y operadores.
- **Acceso sin dependencia de dominios administrativos.** El usuario no debería estar atado a ningún operador. En función de su perfil, debería ser capaz de elegir, en cada instante, el mejor sistema disponible, cumpliendo con los requerimientos de rendimiento exigidos por los servicios en uso.
- **Servicios sensibles a la localización y contexto del usuario.** Principalmente mediante el uso de sensores de bajo consumo, los servicios adquirirán conocimiento de la posición del usuario y podrán personalizar su oferta de acuerdo a la misma.
- **Avanzados mecanismos de facturación.** El acceso por parte del usuario a redes y servicios sin límites administrativos, exige de la implantación de mecanismos de facturación que permitan adaptarse a la dinamicidad del consumo por parte del usuario.
- **Terminales multi-modo.** Los terminales de usuario deberían soportar múltiples tecnologías radio. Esto permitirá que el terminal pueda soportar procesos de itinerancia entre redes de diferentes RAT.

Todas las nuevas propuestas, incluso aquellas que profetizan las características, tecnologías y arquitecturas para las redes más allá del 4G [Gohil et al., 2013], siguen en todo o parte la filosofía descrita para las NGWN. Existen múltiples retos tecnológicos que deben ser resueltos antes de hacer realidad una red que cumpla con la visión de las NGWN. Dentro de ellos, unos de los más relevantes es aquella relacionada con la gestión de los recursos radio, que permite asignar los recursos óptimos a los usuarios en base a una diversidad de requerimientos provenientes de diferentes fuentes. En el siguiente apartado se describe las nuevas propuestas que se han realizado con respecto a este tópico, que intentan cumplir con las características y requerimientos de los futuros escenarios NGWN, y que servirán como marco de referencia para las aportaciones realizadas en la Tesis.

2.3. Gestión de los recursos radio en NGWN

Durante el establecimiento de la comunicación entre el usuario y la red, se negocia la QoS que esta proporcionará al tráfico generado por los servicios del usuario. Dicha QoS tiene que ser gestionada por la red sobre los recursos radio que tiene a su disposición. Particularmente en los sistemas inalámbricos, realizar esa tarea conlleva tener en cuenta varias restricciones que la hacen compleja, por lo que se diseñan técnicas con el objetivo de asegurar una óptima distribución de los, habitualmente escasos, recursos radio. Ese es el papel que se desarrolla bajo el concepto de *Radio Resource Management (RRM)*. En los sistemas inalámbricos tradicionales el RRM se centra en el contexto de un único RAT, e involucra funcionalidades como el control de admisión y congestión, traspaso horizontal, planificación de paquetes y control de potencia. Considerando un escenario NGWN, donde existen una plétora de RAT y operadores, varias de dichas funcionalidades tendrán que cumplir un papel común, a la vez que serán necesarios nuevos mecanismos que exploten la ventaja de disponer de una visión global de todos los RAT involucrados en el escenario. Con este fin se define una entidad funcional adicional, que es responsable de interconectarse con las RAT de las redes de acceso (*Radio Access Network, RAN*) involucradas. Actualmente existen dos alternativas principales que proponen

nuevos esquemas RRM para llevar a cabo una eficiente gestión de los recursos radio en un contexto con múltiples RAT: *Common Radio Resource Management* (CRRM) y *Joint Radio Resource Management* (JRRM). CRRM fue propuesta por el 3GPP para habilitar la cooperación entre redes UMTS y GSM, mientras que el concepto de JRRM surgió dentro de los proyectos europeos EVEREST [Casadevall et al., 2004] y AROMA [Casadevall et al., 2006]. A diferencia de la primera, la arquitectura de JRRM no está restringida a las redes móviles celulares, sino que también está diseñada para tener en cuenta otras tecnologías inalámbricas, como WLAN.

Dependiendo de las funcionalidades RRM que pasan a formar parte del CRRM, se pueden distinguir diferentes grados de interacción [Perez-Romero et al., 2005]:

- **Interacción básica:** Cuando se considera un escenario NGWN, la interacción entre RRM y CRRM genera, en principio, dos nuevas funcionalidades. Una de ellas es la selección inicial de la RAT, que decide a qué RAT podría asignarse una determinada solicitud de servicio. Este tipo de selección se denomina inicial, para distinguirlo de la decisión que se lleva a cabo cuando se consideran los criterios relacionados con el traspaso vertical. Esta última funcionalidad tiene como principal objetivo conmutar conexiones en curso de una RAN a otra. Ambas funcionalidades formarían parte del CRRM al adoptarse la estrategia de interacción básica, tal como se muestra en la Figura 2.2b. Las entidades RRM locales proporcionarían cierta información, como las celdas candidatas de las diferentes RAT o sus valores de carga, de tal forma que el CRRM pueda tener en cuenta la disponibilidad de cada RAT a la hora de tomar una decisión sobre un determinado terminal móvil. Sin embargo, una vez que la RAT ha sido seleccionada, es la correspondiente entidad RRM local la que tiene que ejecutar los procesos específicos de control de admisión y traspaso horizontal, que pueden limitar el proceso de selección de acceso en su trayectoria hacia la decisión final.
- **Interacción intermedia:** Una propuesta de interacción más elevada es que la entidad CRRM se haga cargo de las funcionalidades que operan a más largo plazo, como los algoritmos de control de admisión y congestión, mientras se mantienen dentro de las entidades RRM locales las funcionalidades que operan a nivel de trama radio o por debajo, tales como el planificador de paquetes o el control de potencia, los cuales requieren una alta frecuencia de intercambio de información entre CRRM y RRM. Esta propuesta permite realizar una gestión más eficiente, al tener la capacidad de ejecutar de forma conjunta los algoritmos que guardan mayor relación con la toma de decisión de la selección de acceso final. Adicionalmente, permite tener una visión más global de la información necesaria para tomar decisiones, por ejemplo bajo el supuesto de una inminente congestión en una determinada RAT. En este sentido, a diferencia de la interacción básica, todas las decisiones con respecto al control de admisión y congestión son tomadas por la entidad CRRM, mientras que las entidades RRM locales únicamente las ejecutan.
- **Interacción alta:** Finalmente, el mayor grado de interacción sería aquel en el que los algoritmos de planificación también se ejecuten dentro del CRRM. Esta propuesta reduce las funcionalidades de las entidades RRM locales, que quedarían limitadas a transmitir la información necesaria al CRRM y ejecutar algunos procedimientos dependientes específicamente de la tecnología, habitualmente en periodos de tiempo muy cortos. Esta propuesta se podría llevar a cabo en escenarios donde un terminal móvil conmuta frecuentemente de RAT (por ejemplo, planificación a nivel de sesión a través

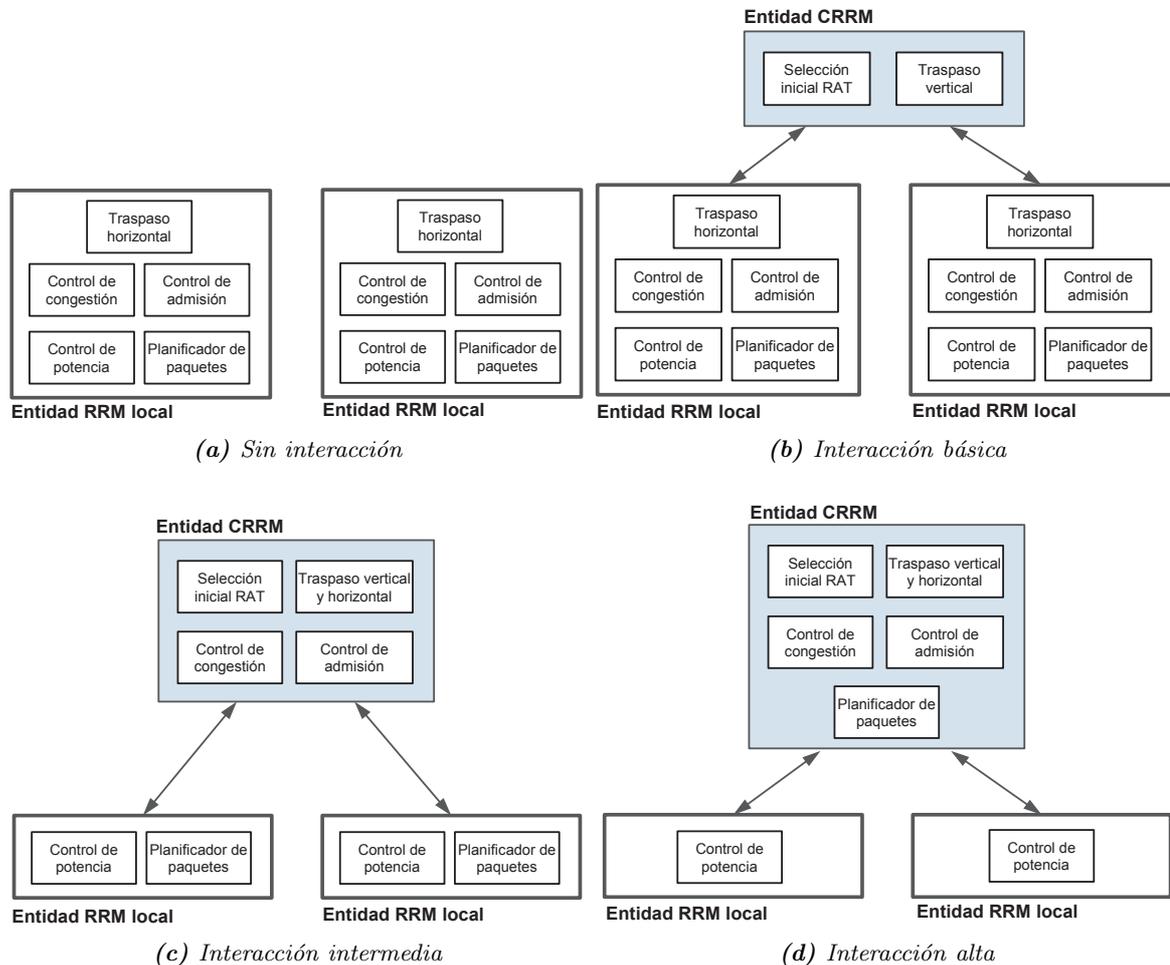


Figura 2.2: Niveles de interacción para la gestión conjunta de recursos radio

de diferentes RAT) o incluso con enlaces simultáneos con diferentes RAT (por ejemplo, planificación a nivel de paquetes a través de capacidades *multihoming*). Esto último es más viable sobre tecnologías basadas en OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [Amzallag et al., 2013], como LTE y WiMAX, debido a que soportan esta funcionalidad de manera intrínseca.

2.4. Selección de acceso en redes inalámbricas heterogéneas

La piedra angular de todas las visiones acerca de las futuras redes inalámbricas es la existencia de un entorno de red con múltiples opciones de acceso, gracias al cual los usuarios tendrán la posibilidad de seleccionar, entre las diferentes redes de acceso disponibles, la más apropiada para satisfacer los requisitos exigidos por una determinada aplicación. Esto permite incluso que se propongan nuevos modelos de negocio, como alternativas al tradicional, que mantiene al usuario “atado” como un abonado estático [O’Droma y Ganchev, 2007]. De acuerdo a esos nuevos modelos, el usuario tiene la libertad de transitar entre los diferentes proveedores de servicio y operadores de red, seleccionando las alternativas que ofrezcan las

características más interesantes. Para llevar a cabo esta visión es necesario contar con mecanismos de selección de acceso que establezcan en todo momento cuál es la red de acceso más adecuada para cumplir con las expectativas provenientes tanto del usuario, como de los servicios y del operador. En este sentido, seleccionar la red de acceso óptima es una tarea compleja pero, a la vez, muy importante, debido a que de ello depende la estabilidad de la red, la utilización adecuada de los recursos, la satisfacción del usuario, la provisión de la QoS, entre otros aspectos. Una elección de red deficiente, desde el punto de vista del usuario, puede derivar en problemas tales como el uso innecesario de costosos tipos de acceso o una ingrata experiencia de la QoS. Por parte del operador conllevaría la infrautilización de los recursos, obteniendo por tanto una menor rentabilidad de la infraestructura desplegada. Sin embargo, elegir la mejor RAT no es una tarea trivial, ya que existen numerosos parámetros, criterios y estrategias a tener en cuenta cuando se selecciona la mejor red de acceso. En este apartado se mencionan dichas consideraciones, describiendo de forma general los diferentes aspectos a tener en cuenta durante el proceso de selección de acceso, los cuales servirán como referencia para los esquemas planteados dentro del marco de esta Tesis.

2.4.1. Estructura general del proceso de selección de acceso

Dentro de las estrategias adoptadas por el CRRM, descritas en el Apartado 2.3, el proceso de selección de acceso se inicia con el módulo de **Selección inicial de la RAT**, que guarda relación directa con las demás entidades y, de forma muy estrecha, con el módulo de **Traspaso horizontal y vertical**, de tal forma que muchas veces se difumina la frontera entre ambos. De forma general, una estructura para la gestión eficiente de la selección de acceso en redes inalámbricas heterogéneas está constituida por las siguientes funcionalidades [Piamrat et al., 2011]: monitorización de recursos, toma de decisión y ejecución de la decisión adoptada. Cada uno de esos procedimientos guarda una estrecha relación con su antecesor, tal como se muestra en la Figura 2.3; esto es, la toma de decisión depende de la información adquirida durante la monitorización de los recursos, la ejecución se realiza en base a la decisión tomada en la fase anterior y, finalmente, una vez asignado el recurso, éste se sigue monitorizando, cerrando de esta forma el lazo del proceso de selección de acceso. Dependiendo de la estrategia adoptada para su modelado, todos, o parte de, los procedimientos involucrados podrán desarrollarse dentro del ámbito de la red o del usuario.

- **Etapa de monitorización:** En esta fase se obtiene la información que será utilizada como entrada al algoritmo de toma de decisión. Está constituida por los valores que adoptan en todo momento los parámetros provenientes de diferentes fuentes: el usuario, la red, y los servicios, entre otros. Esta fase se ejecuta no solo al inicio del proceso de selección de acceso sino también después de ejecutarse la decisión. Al inicio del proceso recoge toda la información necesaria para determinar cuál es la mejor RAT de acuerdo a la actual solicitud de recursos. Si tras ejecutarse la decisión, se asignaron recursos a dicha solicitud, esa nueva conexión se monitorizaría para determinar su estado actual, ya que podría sufrir alguna degradación, debido, por ejemplo, al movimiento del usuario cerca de la cobertura de la celda actual, o la existencia de congestión en la red. Esas u otras situaciones que pongan en riesgo la QoS comprometida cuando la conexión fue admitida, podrían derivar en un nuevo proceso de toma de decisión.
- **Etapa de decisión:** Esta fase supone el componente fundamental en la gestión de recursos radio. Está constituida por un algoritmo que, en base a la información admitida en la etapa de monitorización, implementa las políticas y estrategias que dan forma a

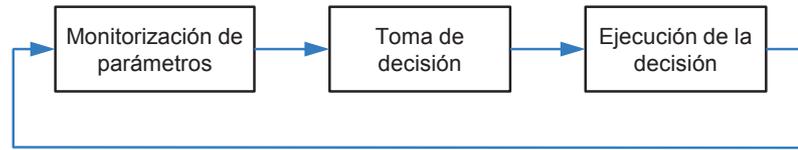


Figura 2.3: Etapas del proceso de selección de acceso

la solución de selección de acceso adoptada. Dependiendo si ésta se adopta dentro del ámbito de la red, del usuario o ambos, de forma colectiva, se define el enfoque de esta etapa, tal como se describe con más detalle en el siguiente apartado. Fundamentalmente, en esta etapa se tiene que decidir cuál es el acceso que mejor cumple con los requisitos considerados por la estrategia de selección de acceso, por ejemplo, preferencias del usuario, balanceo de carga de la red, QoS de la conexión (lo que implicaría la asignación del ancho de banda solicitada), entre otros.

- **Etapa de ejecución:** Como resultado de la etapa previa se podría encontrar o no el acceso adecuado a la solicitud realizada. En esta fase se ejecuta dicha decisión, bien de forma estricta o flexible, considerando, por ejemplo, el tipo de servicio para el que se solicita la conexión (tales como de tiempo real o no). Si la ejecución se realiza de forma estricta, y no hay un acceso adecuado, se rechazaría inmediatamente la petición de conexión, mientras que, si es flexible, se podría solicitar, por ejemplo, que se reduzcan los requisitos de la conexión, o dejarla en espera, a la vista de que cambien favorablemente los valores de los parámetros monitorizados.

2.4.2. Estrategias para la toma de decisión

Siendo la etapa de decisión la que mayor relevancia tiene durante todo el proceso de selección de acceso, en este apartado se describe el comportamiento que puede adoptar, en base al ámbito en el cual se toma la decisión. En la literatura existe un notable número de artículos que exponen diversos modelados del proceso de toma de decisión con enfoques que dan más relevancia al origen de los parámetros monitorizados (*user-centric*, *operator-centric*, *service-centric*) o que otorgan mayor importancia a la entidad que resulta más beneficiada de la decisión adoptada (*network-controlled*, *terminal-controlled*, *network-assisted terminal-controlled*, *terminal-assisted network-controlled*). Realmente los matices entre esa gama de enfoques son poco relevantes, razón por la cual en [Kassar et al., 2008] se lleva a cabo la clasificación que se describe a continuación.

- **Enfoque centrado en la red:** Las decisiones se realizan en el lado de la red y están basadas fundamentalmente en los beneficios y necesidades del operador, así como en las condiciones de la red. Algunos mecanismos pueden considerar los requerimientos del usuario, pero en general no se les asigna un peso significativo comparado con los provenientes de la red o del operador. Los esquemas que utilizan esta alternativa buscan optimizar el uso de los recursos desplegados por el operador, el balanceo de la carga entre los diversos RAT, o una mayor rentabilidad de la infraestructura de red, entre otros.
- **Enfoque centrado en el usuario:** Las decisiones adoptadas se realizan en el lado del terminal y están basadas únicamente en el beneficio del usuario, sin considerar los

requerimientos de la red. Es un enfoque estrictamente local, comparado con la solución centrada en la red, la cual tiene una visión más global del sistema. Existe cierto debate en cuanto a la problemática que puede generar este esquema debido a que los nuevos usuarios solo tienen en cuenta su propio beneficio, incluso sin considerar la situación de otros usuarios previamente conectados. En este sentido, decisiones adoptadas bajo este enfoque pueden derivar en una degradación de la QoS de los usuarios activos.

- **Enfoque colaborativo:** Las dos alternativas anteriores representan los extremos entre las que se encuentra el enfoque colaborativo, que tiene en cuenta los beneficios tanto del usuario como de la red a la hora de tomar una decisión. Permite, por tanto, aprovechar las ventajas del conocimiento global que caracteriza al enfoque centrado en la red, y los requerimientos del usuario exigidos por la alternativa centrada en el usuario. Al considerar las necesidades de ambas entidades, que pueden presentar, en algunos casos, intereses opuestos, existe la posibilidad de que el algoritmo no converja a una decisión. Este es un inconveniente que se debe tener en cuenta a la hora de modelar el proceso de selección de acceso.

2.4.3. Herramientas matemáticas para el modelado de la selección de acceso

Los apartados anteriores han servido para describir las diferentes alternativas que se presentan a la hora de diseñar una estrategia de selección de acceso. Llegado a este punto es necesario modelar dicha estrategia, utilizando para ello instrumentos matemáticos que permitan dar forma al algoritmo que servirá como núcleo del proceso de selección de acceso. A continuación se describen brevemente las herramientas matemáticas que más se utilizan en la literatura, y cuya elección depende principalmente del objetivo al que apunte la estrategia de selección de acceso diseñada [Wang y Kuo, 2013].

- **Teoría de la utilidad:** En la teoría desarrollada en [Von Neumann y Morgenstern, 2007] se define la utilidad como la habilidad de un bien o servicio para satisfacer una necesidad humana. Un término relacionado con dicho concepto es la función de utilidad, que indica la utilidad que un bien o servicio le reporta a un consumidor, teniendo en cuenta que usuarios con preferencias distintas tendrán diferentes valores de utilidad para un mismo producto. Desde el punto de vista de la selección de acceso, las medidas del nivel de satisfacción del usuario dependen del conjunto de características ofrecidas por una red de acceso. Para ello el usuario define una serie de atributos o criterios que la red debe satisfacer en mayor o menor medida, en base a una determinada función de utilidad. Varios trabajos en la literatura han abordado diferentes formas normalizadas para la función de utilidad de cada criterio, siendo principalmente de tipo escalón, logarítmica, exponencial y sigmoideal. Se debe tener en cuenta que un problema de selección de acceso involucra múltiples atributos, cuya combinación y la relación que existe entre ellos queda definida por otra función, denominada función de coste o utilidad agregada, que es la que permite asignar finalmente un valor global a cada alternativa de acceso. La utilidad agregada puede seguir un patrón aditivo, tal como se realiza tradicionalmente, ser definido en base a un productorio, tal como se propone en [Nguyen-Vuong et al., 2008b], o incluso como una combinación de ambas alternativas [McNair y Zhu, 2004].
- **Teoría de la decisión multicriterio:** Frecuentemente la toma de decisiones tiene que hacer frente a problemas que involucran múltiples, usualmente conflictivos entre sí,

criterios. En general este tipo de problemas de decisión se basan en la elección de una de las alternativas de acuerdo a la valoración que se les otorga, frente a un determinado conjunto de criterios. La importancia de dichos criterios se pondera según los objetivos del proceso de decisión, y la calificación global de una alternativa es la suma ponderada de la calificación individual de cada criterio. Las alternativas se ordenan en base a las puntuaciones obtenidas y, en base a ello, se clasifican para adquirir una determinada preferencia. Los diversos algoritmos utilizados para implementar cada una de estas fases se engloban dentro de un conjunto de mecanismos denominados *Multi-Attribute Decision Making* (MADM). Desde el punto de vista estrictamente académico, la teoría de decisión se presenta como un marco de referencia para el desarrollo del denominado *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), que a su vez se divide en dos: *Multi-Objective Decision Making* (MODM), para abordar problemas de decisión en el que el espacio de alternativas de decisión es continuo e infinito, y MADM, con soluciones factibles que pertenecen a un conjunto discreto y finito. A pesar de esas diferencias, en la literatura se utilizan indistintamente los términos MCDM y MADM [Triantaphyllou, 2000]. Los algoritmos más utilizados para implementar los procesos de selección de acceso son ([Song y Jamalipour, 2005], [Bari y Leung, 2007], [Sun et al., 2009]): *Elimination and Choice Translating Priority* (ELECTRE), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Grey Relational Analysis* (GRA), *Simple Additive Weighting Method* (SAW), entre otros.

- **Lógica difusa:** Los elementos de información provenientes de diferentes fuentes son, en general, muy diferentes, contradictorios y, en muchos casos, imprecisos. Debido a ello puede ser necesario considerar, dentro del problema de selección de acceso, determinados criterios que presenten una cierta incertidumbre en sus valores. En estos supuestos los métodos clásicos, como MCDM, no son capaces de abordar adecuadamente este tipo de problemas, ya que requieren como entrada datos precisos. Cuando el factor de incertidumbre forma parte de la naturaleza del criterio, el problema de selección de acceso puede ser modelado con la lógica difusa (*Fuzzy Logic*). Existen diferentes formas de utilizar la teoría de lógica difusa en los esquemas de selección de redes. Algunos estudios lo utilizan como parte principal del esquema de selección; otros combinan la lógica difusa con los algoritmos MCDM; en otros casos se utiliza junto con mecanismos de recursividad, con el objetivo de refinar sus resultados; y también existen propuestas que utilizan algoritmos complementarios para determinar los pesos asignados a los criterios [Alkhawlani y Ayesh, 2008].
- **Teoría de juegos:** Un juego es cualquier situación estratégica en la que existe una dependencia entre los participantes, los cuales se rigen por un conjunto de reglas para lograr un objetivo determinado. Los participantes son las entidades que toman decisiones racionales de forma individual, adoptando una determinada estrategia, con el objetivo de maximizar su propia utilidad. En un juego, la estrategia de cada participante tiene impacto, no solo sobre su propia utilidad, sino en la utilidad que puedan obtener los otros participantes. Los juegos se pueden categorizar en cooperativos, si los participantes actúan de manera coordinada, y no cooperativos, en caso contrario. Cuando alcanza una combinación que incluya la mejor estrategia para cada participante, se dice que se ha logrado el **Equilibrio de Nash**. Se trata de una solución del juego, en el cual ningún participante puede alcanzar más utilidad cambiando unilateralmente su propia estrategia. Las técnicas de teoría de juegos se han adoptado de manera re-

levante dentro de los esquemas de selección de acceso recientemente, categorizándose principalmente en tres grupos: juegos entre usuarios, entre redes, y entre usuarios y redes.

- **Técnicas de optimización:** En muchos casos la búsqueda de la mejor alternativa de acceso o el mayor rendimiento de la red, no implica necesariamente encontrar la solución óptima. Para ello es necesario el uso de técnicas específicas que determinen dicho valor, siendo éste la mejor alternativa de decisión dentro del conjunto de soluciones posibles. Los algoritmos de optimización empiezan con la formulación del problema en base a tres componentes: las variables, las restricciones y la función objetivo. Las variables representan las decisiones que se pueden tomar para lograr un determinado objetivo. Una variable puede representar, por ejemplo, la situación de conectividad de un terminal móvil con una determinada estación base. Por su parte, las restricciones modelan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo, el hecho de que todos los recursos asignados a los terminales conectados a una estación base no supere su capacidad. Finalmente, la función objetivo es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Un objetivo de un problema de selección de acceso puede ser, por ejemplo, la maximización del beneficio de un operador. Después de modelar el problema es necesario resolverlo, lo que implica encontrar el valor que deben tomar las variables para optimizar la función objetivo, satisfaciendo el conjunto de restricciones. Los métodos de optimización se pueden clasificar en métodos clásicos, entre los que se encuentran la optimización lineal, lineal entera mixta, no lineal, estocástica, dinámica, etc.; y, por otra parte, aparecen los métodos metaheurísticos, los cuales se encuentran ligados a lo que se conoce como inteligencia artificial. En este segundo grupo se incluyen los algoritmos evolutivos (genéticos entre otros), el método *simulated annealing* o los basados en búsquedas heurísticas (método tabú, búsqueda aleatoria, etc.).

Arquitecturas de Referencia

En los últimos años se han hecho muy conocidos lemas como *Internet of the Future* o *Next Generation Wireless Networks*, que han atraído el interés de la comunidad científica. Como consecuencia, se han realizado diferentes propuestas que abordan algunos de los retos que permitirían hacer realidad las visiones que hay detrás de ellos. Estas iniciativas tienen un amplio alcance conceptual, y presentan también diferentes características y filosofías; desde aquellas más revolucionarias, que no solo proponen nuevos protocolos o tecnologías, sino un cambio global de pensamiento, hasta otras que promueven una estrategia de migración, que facilite la adopción y evolución de las arquitecturas tradicionales para que puedan integrarse en su nuevo enfoque.

Durante el desarrollo de la Tesis, se han llevado a cabo contribuciones en diversos proyectos de investigación, además de los mencionados en la Sección 2.1, en los que se han generado ideas que a su vez han servido como marco de referencia a los estudios que constituyen el núcleo de este trabajo. En esta sección se describen los proyectos más destacados, que proporcionan tres puntos de vista importantes y complementarios entre sí. El primero ha aportado un enfoque de la conectividad existente entre diferentes dominios de red, para el que, teniendo en cuenta la heterogeneidad de las tecnologías involucradas, se propone un control unificado en base a la composición funcional entre ellas. El segundo proyecto ha permitido simplificar las ideas en cuanto al uso coordinado de diferentes protocolos y tecnologías de red, ante el repentino aumento en los requerimientos de recursos por parte del usuario. Finalmente, el último proyecto ha proporcionado una perspectiva con respecto a las necesidades de conectividad que exige un servicio disponible en cualquier momento y lugar, teniendo en cuenta el contexto que rodea al usuario.

3.1. Ambient Networks - Cooperación entre redes heterogéneas *Beyond 3G*

Tradicionalmente las redes fijas han proporcionado el nicho de desarrollo de las tecnologías Internet y, por ende, todas las soluciones dentro de este ámbito se basan en protocolos Internet diseñados e implementados como medio para lograr satisfacer las necesidades de interconectividad. Este claro dominio de las tecnologías Internet ha influido de manera notable en su adopción dentro del contexto de las redes inalámbricas, con la consecuencia de que, en la actualidad, el protocolo IP se ha convertido en el elemento común que permite el intercambio de datos entre redes heterogéneas. Sin embargo existe una divergencia cada vez más creciente en los planos de control de red, tanto para tecnologías fijas como inalámbricas.

Se establecen diferentes esquemas para implementar, por ejemplo, servicios de redes privadas virtuales, seguridad, movilidad, QoS, multicast, etc., y, aunque para muchos de esos servicios se desarrollan mecanismos que garantizan su interconectividad, sus esquemas de control están cada vez más fragmentados. Por tanto, la red en su conjunto se aleja paulatinamente de la visión inicial de Internet, planteada alrededor de una conectividad integral extremo a extremo.

La problemática descrita trae como consecuencia una creciente heterogeneidad, no solo tecnológica, sino también administrativa, lo que causa que los sistemas de comunicaciones puedan adoptar en el futuro un enfoque diferente al actual. Ante este escenario el proyecto *Ambient Networks*, perteneciente al VI Programa Marco de la Unión Europea, define una arquitectura que permite una interoperatividad transparente entre redes heterogéneas, mediante el uso de un único plano de control distribuido en las diferentes redes. Está constituido por un conjunto de funciones de control, que operan principalmente a nivel de red, y que son implementadas como una capa superpuesta (*overlay*) sobre las existentes originalmente. Este planteamiento permite mostrar de manera homogénea las diferentes tecnologías de control de red a sus potenciales usuarios, aunque con ello también introduce el riesgo de incrementar la complejidad en su operatividad. Para evitarlo se define un control de red basado en dominios, dentro de los cuales existe un conjunto de funciones de control estrechamente coordinadas y relacionadas con la red sobre la que se implementan. Todos esos mecanismos se orquestan bajo el marco del *Ambient Control Space* (ACS), que muestra al exterior una interfaz más sencilla, con la que se pueden establecer procesos de interconectividad con otras redes. El concepto desarrollado dentro de *Ambient Networks* es incluso más ambicioso, ya que haciendo uso de la interfaz universal del plano de control, propone desarrollar técnicas mediante las cuales los ACS de diferentes redes puedan ser combinados de forma recursiva para soportar escenarios más complejos, con la misma estructura básica de un ACS individual. Este concepto se denomina *network composition* y puede ser visto como la generalización, en el plano de control, de los esfuerzos que se han ido acometiendo respecto a la interconectividad en el plano de usuario (reenvío y encaminamiento de paquetes), y que han sido la base del éxito de Internet [Niebert et al., 2007].

3.1.1. Ambient Control Space

El ACS representa uno de los pilares sobre los que se sustenta la arquitectura de *Ambient Networks*. Representa el marco en el que se organizan las diversas funciones de control necesarias para garantizar la cooperación entre redes. En este sentido, no solo se encarga de la gestión de las funciones de transporte dentro de su propio dominio de red, sino que es, además, responsable de establecer acuerdos con redes vecinas para proporcionar servicios extremo a extremo, mediante el establecimiento de una cadena de funcionalidades, abarcando todas las redes involucradas en la comunicación. La Figura 3.1 muestra un esquema simplificado de la estructura lógica de un nodo *Ambient Networks* (AN), distinguiéndose dos de sus principales módulos. El primero es el *Ambient Connectivity*, que representa la abstracción de la infraestructura de red existente y que, por tanto, es encapsulado para facilitar su integración en la arquitectura de *Ambient Networks*. El segundo módulo es precisamente el ACS que, a su vez, está constituido por dos entidades: las funciones de control y las interfaces del ACS.

Teniendo en cuenta que los usuarios se mueven a través de varios dominios de red, y siempre desean aprovechar el mayor número de capacidades a su alcance, es necesario que el ACS se extienda sobre varios dominios. Esto podría potencialmente conllevar que *Ambient Networks* no solo involucre diferentes tecnologías de red sino que también pueda extenderse a distin-

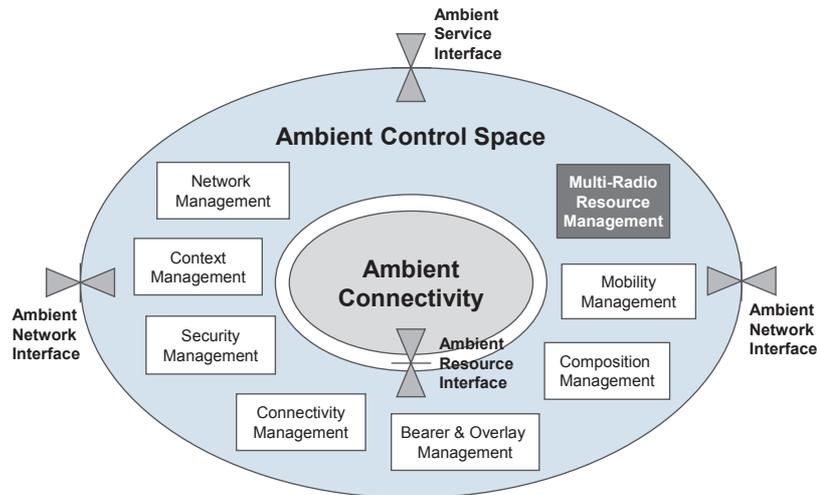


Figura 3.1: Arquitectura funcional de Ambient Networks

tas entidades administrativas o económicas, incrementándose por tanto la complejidad de los procesos de interconectividad. Para llevar a cabo esta tarea *Ambient Networks* incorpora el *Ambient Network Interface* (ANI), que facilita la comunicación entre los ACS de las diferentes redes, creando y compartiendo un plano de control común que permita implementar las funciones de interconectividad necesarias. El ANI se utiliza en la negociación de los acuerdos de composición de red así como para transferir información de control entre las redes.

El acceso a los servicios de una red AN se realiza a través del *Ambient Service Interface* (ASI). Incluso después de haberse completado la composición de redes AN, esta interfaz asegura que las entidades externas sólo vean un único espacio de control homogéneo. En este sentido, una aplicación o servicio, haciendo uso de las funciones del ACS, encontraría el mismo entorno independientemente del ASI con el que se encuentre conectado, gracias los mecanismos implementados en el ACS y el ANI que dan soporte a esta funcionalidad.

Finalmente, el *Ambient Resource Interface* (ARI) permite a las funciones del ACS interactuar con los recursos de las redes ya desplegadas, que no implementan de forma nativa la filosofía de *Ambient Networks*; proporcionan por tanto una abstracción de los recursos de la infraestructura subyacente. Debido a ello, las funciones del ACS no están atadas a ninguna tecnología de red en particular, siendo intercambiables entre diferentes tipos de redes.

Por su parte, las **funciones de control** del ACS son entidades que cooperan entre sí para implementar funcionalidades específicas dentro de un determinado dominio de red. La arquitectura ACS se caracteriza por ser de naturaleza distribuida y presentar una alta modularidad, lo que hace posible que solo sea necesario un número reducido de funciones de control para crear una red AN. Si fuera necesario se podrían añadir o eliminar funciones de control al ACS mientras que la red esté en su funcionamiento habitual. La Figura 3.1 muestra, como rectángulos, las funciones de control más relevantes. Dentro de ellas destaca el *Multi-Radio Resource Management* (MRRM), por su estrecha relación con las contribuciones de esta Tesis.

3.1.2. Arquitectura de acceso multi-radio

El principal problema que una arquitectura de acceso multi-radio debe resolver es cómo hacer frente a la heterogeneidad de las redes, a la vez que simplifica el acceso de los usuarios a sus servicios con la mejor calidad posible. Este problema no solo es fundamental para los

conceptos de acceso multi-radio, sino que también es el punto de partida de *Ambient Networks*. Las funcionalidades típicas del acceso multi-radio, tales como *network advertisements*, *network discovery* y *resource aware access selection*, proporcionan información al proceso de *network composition*, permitiendo el uso eficiente de los escasos recursos radio dentro de una red, o entre varias tecnologías de acceso. Por otra parte, las funciones multi-radio deberían ser capaces de interactuar eficientemente con otras, beneficiándose a su vez de esta interacción. Un ejemplo sería la interdependencia que existe, alrededor de los recursos radio, entre las funciones de selección de acceso, gestión de la movilidad, y gestión del contexto de AN. Además, la decisión de seleccionar un acceso de una determinada tecnología de red, no debería solo basarse en los recursos radio disponibles, sino también en la información relacionada con otros tipos de recursos de red, así como en las políticas aplicadas por el operador o el usuario. De acuerdo a las premisas mencionadas, se podría decir que las funciones de acceso multi-radio son una parte integral del amplio concepto concebido en *Ambient Networks*, orientadas a evitar la proliferación de un mosaico de soluciones de control de red.

Entidades funcionales

La arquitectura de acceso multi-radio propuesta dentro del marco de *Ambient Networks*, esta constituida por dos entidades principales [Sachs et al., 2004]: *Multi Radio Resource Management* (MRRM) y *Generic Link Layer* (GLL). Estas no solo se comunican entre ellas, sino que también interactúan con otras entidades funcionales del ACS, que mantienen cierta relación con los procesos de selección de acceso, con el fin de enriquecerse con la información de control que cada uno puede aportar. La Figura 3.2 pone de manifiesto esa relación, así como la ubicación funcional de dichas entidades, que se describen a continuación.

- **Gestión de recursos multi-radio.** Es responsable de la gestión conjunta de los recursos, y de la distribución de la carga entre los diferentes accesos radio (*Radio Access*, RA) disponibles. El termino RA se usa para referirse a cada uno de los canales radio independientes, ya sea dentro de una misma o en diferentes RAT. Esta entidad, que se activa ante eventos de nueva sesión, movilidad y optimización de recursos, opera en tres niveles. A nivel de sistema, el MRRM realiza el control de la congestión, de la carga, del espectro radio, entre otros; a nivel de sesión, coordina las decisiones correspondientes a los diferentes flujos asociados a la misma; y, a nivel de flujo, establece y mantiene los RA, que en algunos casos pueden formar parte de diversas rutas multi-salto [Koudouridis et al., 2005].
- **Capa de enlace genérica.** Realiza un procesado genérico del nivel de enlace, proporcionando una interfaz uniforme hacia los niveles superiores, así como una abstracción de las tecnologías radio subyacentes. Está constituido por un conjunto de funcionalidades de nivel de enlace (denominado *toolbox*) que facilitan la interconectividad eficaz entre múltiples accesos radio. La GLL permite realizar dos aplicaciones novedosas: la primera, denominado *Multi-Radio Transmission Diversity* (MRTD), se basa en el uso paralelo o secuencial de múltiples RA para transmitir un único flujo de tráfico. La segunda, llamada *Multi-Radio Multi-Hop Networking* (MRMH), conlleva proporcionar soporte, a nivel de enlace, a las conexiones inalámbricas constituidas por múltiples RA a lo largo de una ruta de comunicación multi-salto.

Tal como se muestra en la Figura 3.2, la GLL se sitúa encima de las funcionalidades nativas del RA a nivel de enlace, reemplazando incluso algunas de ellas, lo que le permite implementar

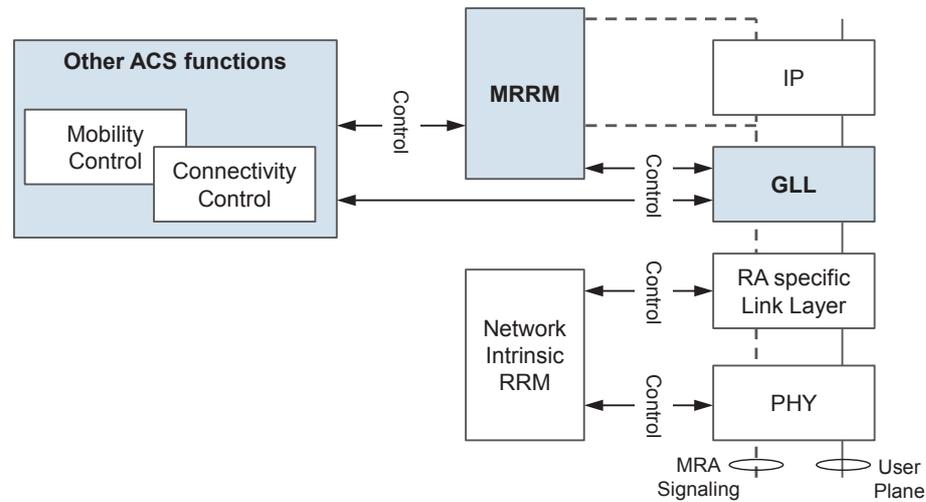


Figura 3.2: Diagrama funcional de la arquitectura de acceso multi-radio

la interfaz uniforme hacia las capas superiores, y la abstracción de las tecnologías radio subyacentes. Por su parte, las funciones del MRRM se construyen en base a las operaciones RRM intrínsecas de la red, que pertenecen al RA subyacente, por lo que no se encuentran dentro de la arquitectura multi-radio de AN. Se consideran dos alternativas para transmitir la señalización MRRM entre diferentes nodos AN: a través de IP, o directamente a través de la GLL. Finalmente, la figura muestra el intercambio de información entre el MRRM, la GLL y otras funciones ACS, en concreto por aquellas que se relacionan con el control de la movilidad y la conectividad [Meago et al., 2007].

En general, la GLL abarca funciones que se encuentran cerca del plano de usuario de un flujo de datos, necesitando a su vez operar en una escala de tiempo relativamente pequeña. Estos requerimientos han llevado a proponer una distribución jerárquica de las funcionalidades entre el MRRM y la GLL, dentro del cual la GLL reparte dinámicamente los flujos de datos sobre cualquiera de los RA seleccionados por el MRRM. Además, la GLL ofrece y reutiliza la información de contexto que se transfiere entre entidades GLL durante una nueva selección del RA, para llevar a cabo la conmutación de un acceso de manera transparente. El tipo de información de contexto dependerá de la situación concreta, por ejemplo, de los tipos de RA y si estos se encuentran dentro del mismo o en diferentes nodos AN.

Selección de acceso

Un conjunto de funciones MRRM relacionadas con los procedimientos de selección de acceso, deciden los RA, entre aquellos disponibles, que deberían ser usados para establecer la comunicación correspondiente. La arquitectura propuesta realiza la gestión de los RA por medio de diferentes agrupaciones, cada una con un objetivo específico:

- **MRRM Detected Set (MRRM DS).** Es el conjunto de todos los RA que han sido detectados por el MRRM. Se construye en base a los procedimientos de búsqueda ejecutados por el GLL, o por los mensajes de notificación enviados por otras entidades MRRM, anunciando su presencia.

- ***MRRM Validated Set (MRRM VS)***. Detectados los RA disponibles, se aplican determinadas restricciones en base a políticas que describen los requisitos del usuario, operador, modelo de negocio, seguridad, etc. Eventualmente, algunos RA no cumplirán las restricciones impuestas, por lo que serán eliminadas del MRRM VS.
- ***MRRM Candidate Set (MRRM CS)***. Es un subconjunto del MRRM VS. Está formado por el conjunto de RA candidatos a ser asignados por el MRRM a un determinado flujo de datos. En este punto se tienen en cuenta los requisitos del servicio del que proviene el flujo de datos, en términos de capacidad, QoS, etc.
- ***MRRM Active Set (MRRM AS)***. Está constituido por un subconjunto del MRRM CS. Son los RA asignados por el MRRM a un flujo de datos específico en un momento determinado. Aunque lo habitual es que el MRRM AS cuente únicamente con un solo RA, también se presentan situaciones en las que se asignan más de un RA a un flujo. En estos casos la GLL se encarga de gestionar los accesos seleccionados, distribuyendo el flujo entre ellas.

Los algoritmos de selección de acceso planteados en el marco de esta arquitectura, hacen uso de los conjuntos de RA mencionados; además, consideran diversos parámetros a la hora de determinar el mejor RA para un determinado flujo de datos. También necesitan mecanismos que les permitan reaccionar a los cambios constantes que se producen en las condiciones del entorno, por ejemplo, un deterioro en la calidad de la señal radio y, en consecuencia, reasignar los recursos. Para ejecutar adecuadamente los procedimientos de selección de acceso, el MRRM interactúa con otras entidades funcionales del ACS, tales como, el control de traspaso, gestión de contexto, control de seguridad, etc.

Se pueden plantear diversos objetivos a la hora de diseñar un algoritmo de selección de acceso, que dependerá principalmente de la importancia que se le otorgue a determinadas figuras de mérito. A continuación se describen algunos ejemplos de objetivos que se pueden considerar.

- Seleccionar el acceso con el enlace radio de mayor calidad, por ejemplo, con el más alto SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*). En esas circunstancias se consigue una comunicación de gran calidad, aunque esto también podría depender del nivel de congestión del RA en particular. Adicionalmente, se debería considerar el hecho de que diferentes RA (dependiendo de sus funcionalidades y eficiencia) pueden presentar varios niveles de calidad para una misma SINR.
- Seleccionar el acceso con el nivel de congestión más bajo. Esto permitiría distribuir uniformemente la carga entre los RA disponibles. Sin embargo, debido a que la calidad del enlace radio no se considera en la selección, el usuario podría decantarse por un acceso deficiente y, por lo tanto, experimentar una baja calidad en la comunicación.
- Combinar las ventajas de los dos criterios anteriores para estimar una calidad en las comunicaciones basada en los niveles de congestión y en las características del enlace radio. El inconveniente de esta aproximación es que requiere de un procesado más complejo.
- Tener una lista de prioridades predefinida (por ejemplo, RAT y/o operadores preferidos) en base a la cual se realice la selección del acceso.

Estos y otros criterios de selección de acceso son evaluados en la Tesis, para determinar el impacto que producen en el rendimiento de la red, facilitando la toma de decisiones por parte del operador o los usuarios, en función de los objetivos que persiguen.

3.2. SAIL - Las redes del futuro centradas en la información

Actualmente la red Internet soporta requerimientos y aplicaciones que son completamente diferentes a aquellos para los que originalmente fue diseñado. Se han aplicado numerosos parches para hacer frente a las deficiencias que presenta, por ejemplo, en aspectos relacionados con la movilidad, las aplicaciones multimedia de tiempo real, y la seguridad. Sin embargo, dichas soluciones no presentan un diseño o enfoque integral, por lo que sufren algunas limitaciones, mientras se continua haciendo un uso sub-óptimo de los recursos de red.

Las redes del futuro necesitan adaptarse a los cambios de los patrones de tráfico en el momento que estos ocurren. Las fuerzas catalizadoras que están detrás de dicha evolución son el aumento del número, y la diversidad, de dispositivos móviles conectados a Internet, la variedad de requisitos que presentan las aplicaciones, el número cada vez mayor de tecnologías y redes de comunicación, el dinamismo de las redes sociales, y la flexibilidad con la que nuevos servicios y contenidos se ponen a disposición de los usuarios. La proliferación de soluciones basadas en la computación en nube (*cloud computing*) cubren apropiadamente los servicios orientados a contenidos social-media, respondiendo rápidamente a los cambios en la demanda, por ejemplo, mediante una mejor distribución y gestión de los contenidos, o asignando dinámicamente más recursos de almacenamiento y computacionales, ante un aumento repentino de la demanda. Sin embargo, este tipo de comportamiento “a la carta” no está apropiadamente soportado por los servicios de conectividad incluidos actualmente en los sistemas móviles ni en la Internet, debido a la presencia de una serie de deficiencias en varios niveles del modelo OSI, desde el la capa física hasta las de encaminamiento y transporte, llegando incluso a los niveles de control de la sesión o flujo de datos.

Considerando el panorama descrito, se han propuesto algunos enfoques para hacer frente a las necesidades de las redes del futuro. De hecho, un opción es el diseño de una versión completamente nueva de Internet, planteado como enfoque “borrón y cuenta nueva”. En cambio, otras actividades de investigación se orientan más hacia la evolución de la Internet actual, para que sea más flexible y, en base a ella, hacer frente a los desafíos de las redes del futuro. En este sentido, el proyecto SAIL (Scalable and Adaptive Internet Solutions) [Ahlgren et al., 2011], perteneciente al VII Programa Marco de la Unión Europea, adopta un enfoque evolutivo, abordando tres campos clave para la Internet del Futuro: *information-centric networking*, *cloud networking* y *open connectivity*, que se describen a continuación.

- En la actualidad la mayor parte del tráfico de Internet está relacionado con la distribución de contenidos, mediante el intercambio de archivos, aplicaciones de colaboración, contenido multimedia sobre *streaming*, entre otros. Las aplicaciones emergentes ya no realizan simplemente el intercambio de datos de un extremo a otro, sino que se centran en piezas de información, a las que se accede de diferentes maneras. En este sentido, en lugar de acceder y manipular la información únicamente a través de un direccionamiento hacia los servidores que las alojan, puede resultar atractivo desplazar la información hacia el centro de la arquitectura de la red. El uso de Internet en base a este nuevo enfoque, denominado *information-centric networking* o *Network of Information* (NetInf), plantea diversos retos arquitectónicos, muchos de los cuales no están siendo abordados de manera adecuada en la arquitectura actual, lo que hace que sea un

importante campo de investigación. En este nuevo paradigma, se considera que la información se replica y distribuye en diversas entidades de almacenamiento, por lo que los servicios de red son definidos en base a los objetos de información a los que se pretende tener acceso (páginas *web*, fotos, vídeos, documentos, etc.), independientemente de dónde y cómo son almacenados o transportados. Se considera que este enfoque permite una distribución eficiente de la información a gran escala, independientemente de la aplicación.

- La popularidad de las aplicaciones a las que se acceden a través de la red puede fluctuar rápidamente, produciéndose cambios repentinos en la cantidad de usuarios que hacen uso de las mismas, lo que supone un problema, ya que se hace difícil reaccionar oportunamente con los recursos necesarios, tanto por parte del servidor como por la red. Las estrategias de computación en la nube han abordado con éxito muchos de los desafíos que se han presentado desde el punto de vista del servidor y del almacenamiento, potenciando principalmente las técnicas de virtualización. Sin embargo, todavía no está claro cómo proporcionar un soporte adecuado por parte de la red para este tipo de aplicaciones, cuando estas se ejecutan no solo sobre las redes “a la medida” de los operadores de *cloud computing*, sino sobre todo en las grandes y complejas redes de los operadores dominantes. En ellas, podría resultar factible proporcionar los recursos computacionales, pero no es obvio cómo asegurar de manera dinámica el soporte adecuado de red y la capacidad necesaria. Por tanto, se hace necesaria una integración de la gestión de los recursos de red con la computación en la nube; así, se pretende suministrar los recursos, distribuidos en la nube, mediante los servicios de red adecuados, para acceder a ellos de forma fiable y con la calidad requerida. Esta integración se denomina *cloud networking* (CloNe).
- Después de 20 años de evolución de Internet, la provisión de conectividad sobre las redes existentes se enfrenta a muchos desafíos. Se ha producido un enorme aumento de la capacidad en los niveles más bajos de las tecnologías de red (fibra, cobre, tecnologías inalámbricas), pero así todo la cada vez mayor capacidad disponible en la red no logra cubrir los requisitos de las aplicaciones emergentes (por ejemplo, la distribución de contenidos, computación en la nube, etc.). La heterogeneidad tecnológica hace que sea difícil utilizar las características y recursos crecientes de una determinada red desde un extremo a otro de la comunicación. Por otra parte, los servicios de conectividad existentes son, en su mayoría, planificados, operados, controlados y administrados de forma separada, con escasas posibilidades de cooperación entre ellos. Este enfoque arquitectónico se ha identificado como un factor que impide alcanzar una mayor eficiencia de la red, capacidad de recuperación, escalabilidad y evolución futura. Por tanto, los servicios de conectividad futuros deberían abordar tres aspectos fundamentales que quedan pendientes por resolver en los mecanismos de transporte de la Internet tradicional: potenciar el uso de las funciones avanzadas que ofrecen las tecnologías de enlace; aprovechar la diversidad de tecnologías con que cuenta la red, así como las técnicas de codificación; y, por último, hacer frente a la movilidad de una manera unificada, escalable y distribuida. El concepto de *Open Connectivity Services* (OConS) ofrece un marco que aborda adecuadamente estos problemas; al estar estrechamente relacionado con las aportaciones de esta Tesis, se describe con más detalle en el siguiente apartado.

3.2.1. Open Connectivity Services

El objetivo de OConS [Ferreira et al., 2013] es proporcionar nuevos y mejorados mecanismos de conectividad, que resulten beneficiosos no solo para los usuarios y sus aplicaciones, sino también para los operadores de red. Los usuarios disfrutarán de una mejor calidad de servicio con una conectividad adaptada a sus necesidades, mientras que los operadores lograrán un uso más eficiente de sus recursos, un mayor rendimiento y un adecuado balanceo de carga, lo que contribuirá a la satisfacción de sus usuarios. Para ello, OConS se aprovecha de los mecanismos que funcionan correctamente en la Internet o de los últimos estándares de los sistemas móviles e inalámbricos (por ejemplo, 3GPP y las tecnologías IEEE), mejorando o reemplazando dichos mecanismos o protocolos únicamente cuando sea necesario. Así, los servicios de conectividad se proporcionan mediante una arquitectura novedosa, en la que las tecnologías y los mecanismos presentes y futuros interactúan entre sí, a través de interfaces bien definidas. Además, el enfoque que presenta es escalable y flexible, facilitando la integración y la activación de los mecanismos propuestos, mientras que se hace frente a la dinámica de las redes y la evolución continua de la tecnología.

Los servicios de conectividad OConS se construyen a partir de funcionalidades específicas que son instanciadas bajo demanda, utilizando una política determinada, además de uno o varios protocolos. Esos mecanismos (tanto tradicionales como novedosos) se representan de una manera común y abierta, lo que permite su instanciación, lanzamiento e interconexión a través de interfaces bien definidas. Los servicios de OConS se organizan en tres niveles, tal como se representa en la Figura 3.3.

- ***Link Connectivity Services.*** Son servicios de conectividad típicamente implementados en los niveles físico o enlace de datos. Presentan como característica principal el hecho de que no se extienden más allá de un salto.
- ***Network Connectivity Services.*** Son aquellos que mantienen una estrecha relación con los mecanismos de los niveles red y transporte. Involucran a dos o más nodos, cubriendo, por tanto, uno o más saltos.
- ***Flow Connectivity Services.*** Están relacionados específicamente con la sesión y el flujo de datos establecido entre los extremos de la comunicación, o entre las entidades que se encuentran en los extremos de un dominio.

3.2.2. Arquitectura OConS

La arquitectura OConS se fundamenta sobre tres entidades funcionales, usadas para modelar cualquier mecanismo de conectividad, por lo que introducen un nivel de abstracción que los independiza de cualquier capa o protocolo. Estas entidades separan los componentes de monitorización, toma de decisiones y ejecución, de cualquier mecanismo, para facilitar su integración dentro de los servicios OConS.

- ***Information Management Entity (IE)***, es responsable de la monitorización y la recopilación de información, que puede ser procesada (agregada o filtrada) antes de ser proporcionada a las entidades de decisión que la han solicitado o que se hubieran suscrito previamente.

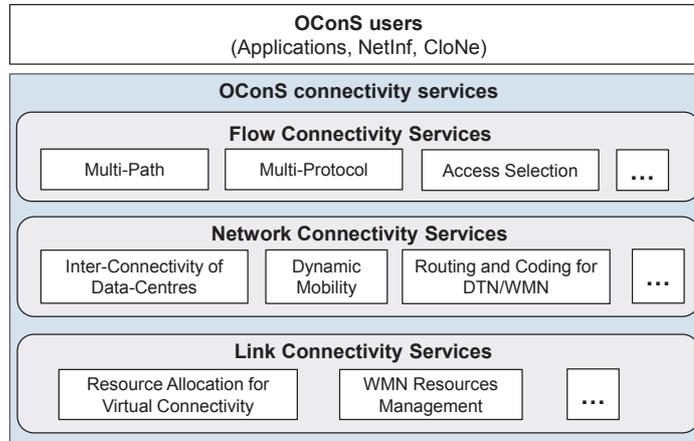


Figura 3.3: Mecanismos incluidos en OConS

- **Decision Making Entity (DE)**, en ella se implementan los algoritmos de decisión. Usa la información que proporcionan los IE, o las decisiones de otros DE como datos de entrada para tomar la suya propia. La toma de decisiones puede estar localizada en un nodo (centralizado) o en varios (distribuido), que interactúan para cumplir con su objetivo.
- **Execution and Enforcement Entity (EE)**, ejecuta las decisiones adoptadas por las DE.

Las entidades y mecanismos OConS son instanciados en un **nodo OConS**, que se encuentra dentro de un **dominio OConS**. Un nodo OConS es un elemento que forma parte de la infraestructura de red (por ejemplo, un terminal, estación base, *router*, o *switch*), que por tanto proporciona recursos computacionales, de almacenamiento y de conectividad a las entidades OConS (incluyendo recursos virtualizados). Es el marco en el que las entidades OConS residen, son instanciadas, y ejecutadas, permitiendo el inicio de los servicios. Puede tratarse de un nuevo nodo o de uno que ya existiera previamente pero que ha sido actualizado con el correspondiente software OConS. Los nodos están asociados a dominios administrativos, que representan la noción básica de propiedad y capacidad de gestión. Por su parte, el dominio OConS está constituido por un conjunto de enlaces y nodos, y proporciona servicios de conectividad a las aplicaciones, a partir de un conjunto de mecanismos OConS (por ejemplo, *Distributed Mobility Management*, *Multi-Path*, *Multi-Protocol*, una combinación de ellos, etc.). Un dominio OConS puede cubrir varios dominios administrativos, en cuyo caso puede reutilizar mecanismos ya existentes, tales como BGP (Border Gateway Protocol), IPX (Internetwork Packet Exchange), etc.

Por otra parte, una funcionalidad fundamental de la arquitectura OConS es la **Orquestación**, que es la responsable de ofrecer la conectividad como si fuese un servicio bajo demanda. No solo cuenta con el conocimiento de los recursos disponibles en los nodos y enlaces utilizados dentro de una determinada red, sino también es consciente de las entidades y mecanismos OConS disponibles. La orquestación puede ser iniciada de manera explícita por un usuario/aplicación o implícitamente, durante la monitorización del estado de la red. En el primer caso, cuando una aplicación tiene requerimientos específicos, los envía al *Orchestration Service Access Point* (OSAP), para que el proceso de orquestación identifique e inicie, entre el conjunto de mecanismos disponibles, aquellos más apropiados para responder a los requeri-

mientos específicos de conectividad. Los mecanismos pueden estar distribuidos sobre varios nodos OConS, cubriendo uno o varios enlaces o dominios OConS.

La orquestación se realiza a varios niveles, cada uno de los cuales contiene funcionalidades específicas, tal como se describe a continuación.

- ***Orchestration Register.*** Durante el proceso de inicio y descubrimiento de las entidades locales, estas son registradas, de forma que la funcionalidad de orquestación tenga conocimiento de su existencia y localización.
- ***Orchestration Monitoring.*** En base al conocimiento que tiene OConS de los recursos disponibles dentro de la red, y haciendo uso de las IE, esta funcionalidad monitoriza el estado de la red, iniciando un mecanismo apropiado como respuesta ante una determinada situación adversa (por ejemplo, congestión de la red).
- ***Entities, Resources and Mechanisms Orchestration.*** Es responsable de la orquestación de las entidades OConS; esto es, realiza el descubrimiento/*bootstrapping*/configuración dentro de un nodo, así como también la asignación y gestión de los recursos de las entidades OConS (capacidad de procesado, memoria, etc.). Cuando recibe una solicitud, con los requisitos de conectividad correspondientes, identifica los mecanismos más apropiados que deberían ser ejecutados, de acuerdo a la información proporcionada por *Orchestration Register*. El resultado se comunica a las funcionalidades de *Link/Flow/Network Orchestration*, responsable de ejecutar y gestionar el mecanismo en particular.
- ***Link, Network and Flow Connectivity Services Orchestration.*** Estas funcionalidades se encargan de la instanciación, composición y la ejecución de los mecanismos OConS (dentro de uno o múltiples nodos), así como su posterior control y gestión, mediante la señalización correspondiente.

Un escenario en el que repentinamente se aglutinan una considerable multitud de usuarios en la misma área geográfica, por ejemplo debido a un evento deportivo, puede ayudar a describir mejor las funcionalidades de la orquestación mencionadas anteriormente. Un gran número de esos usuarios solicitan conectividad para acceder a un determinado servicio, disponible a través de la red (por ejemplo, estadísticas del evento deportivo, centro de apuestas, etc.). La arquitectura de OConS tiene que reaccionar ante el aumento repentino de solicitudes de acceso al mismo contenido, procediendo, por tanto, a ejecutar los mecanismos de orquestación más adecuados para proporcionar al usuario los servicios OConS necesarios. Esto se decide por un DE (posiblemente alojado en una unidad de control del dominio) y ejecutado por los EE implementados en los servidores, *routers*, *switches*, terminales del usuario. Tal como se muestra en la Figura 3.4, la orquestación de los servicios OConS se realiza en base a diversas acciones, descritas a continuación.

- Habilita los mecanismos de transporte *multi-path* en los servidores del centro de datos, para aprovechar todas las posibles rutas entre clientes y servidores, haciendo uso sobre todo de las menos congestionadas;
- Crea nuevas rutas hacia otras instancias del mismo servidor, localizado en otros centros de datos, estableciendo comunicación, mediante señalización OConS, con entidades DE que se encuentren posiblemente en otros dominios;

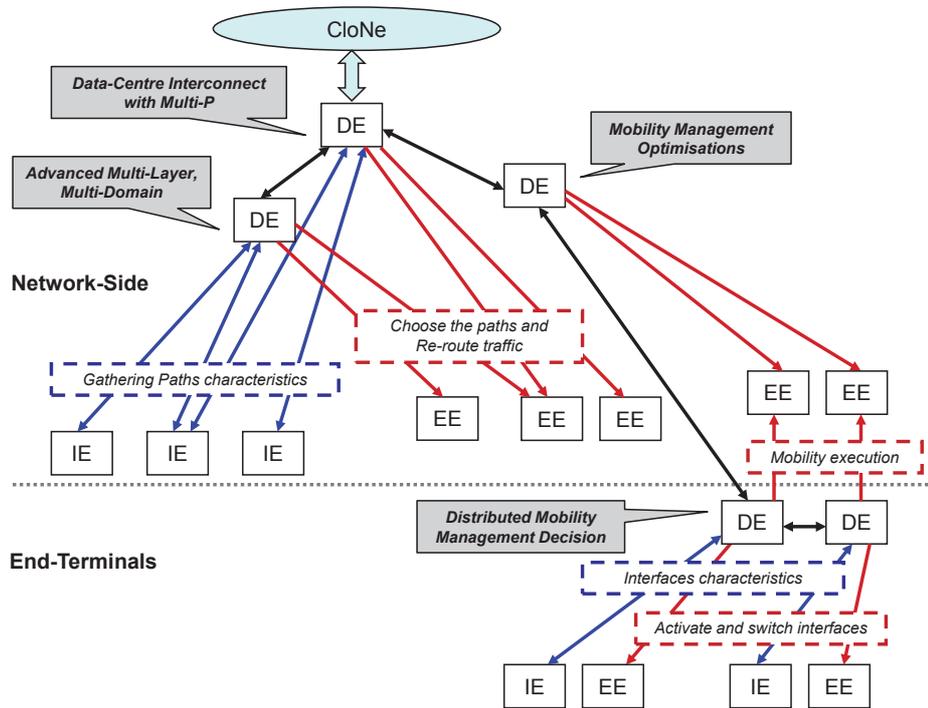


Figura 3.4: Procedimientos de orquestación en un caso de uso específico

- Facilita el traspaso de algunos usuarios desde la red de acceso congestionada hacia otra que se encuentre libre de congestión, interactuando con el DE del gestor de movilidad, que tratará los diferentes usuarios en función de sus capacidades y tecnologías;
- Se establecen las políticas en los terminales con múltiples tecnologías de red, permitiendo el uso simultáneo de dos o más interfaces para conseguir cierto balanceo de carga.

Este ejemplo muestra que la coordinación y ejecución de múltiples mecanismos OConS puede reducir la congestión en las diferentes redes de acceso, proporcionando así una mejor QoE para los usuarios en este tipo de escenarios. Las réplicas locales de un mismo servidor con conectividad mejorada pueden ponerse a disposición de los usuarios, lo que podría ser visto como parte de una gestión global a nivel de *cloud networking*.

3.3. mIO! - Soluciones de conectividad para futuros servicios ubicuos

Analizando la evolución del mercado móvil, y contrastándola con las necesidades detectadas en la sociedad, se puede hacer la previsión de que el futuro no solo traerá nuevas funcionalidades para los terminales, sino también soluciones innovadoras que permitan sacar el máximo partido a sus capacidades futuras e incluso a aquellas que ya empiezan a aparecer. El análisis de la situación actual, tanto de las necesidades de los individuos como del aprovechamiento de la tecnología, y de las consecuentes necesidades de evolución, genera nuevas posibilidades para el individuo, y pone de relieve las áreas en las que es necesario un salto tecnológico que facilite la transición hacia ese futuro:

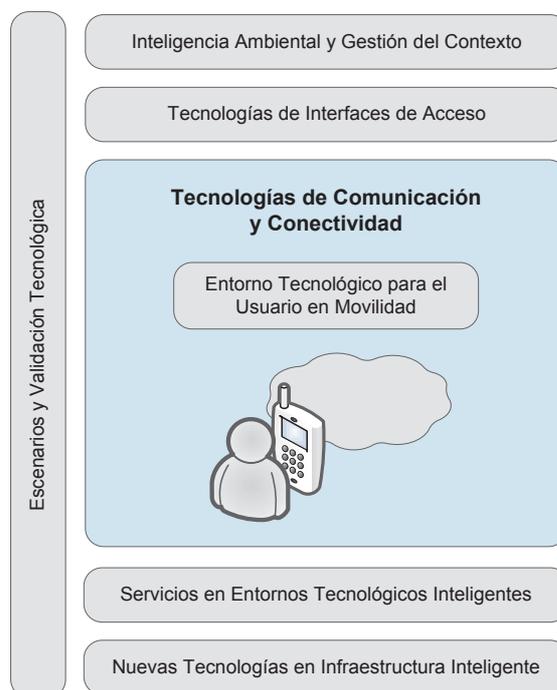


Figura 3.5: Esquema general de la actividades del proyecto mIO!

- Las personas podrán usar el móvil para participar: ofreciendo sus opiniones, creando sus propias aplicaciones e incluso prestándolas como servicios desde sus terminales móviles. Se deberían asegurar garantías de privacidad cuando así lo demanden; además se garantizarán su identidad y reputación digital.
- La interacción del individuo con los servicios y dispositivos inteligentes, que le rodearán en su entorno cotidiano, será fácil y cómoda, y se producirá principalmente haciendo uso de terminales móviles, junto con nuevos *gadgets* que el usuario llevará consigo o tendrá a su disposición en su entorno: la casa, la ciudad, el centro comercial, etc.
- Cada persona tendrá libertad de elección, de forma que pueda obtener la información y servicios que prefiera en cada momento y en cada lugar, es decir, en cada contexto concreto. Además, esta libertad de elección deberá ser sencilla.
- Se creará el entorno que haga posible que las empresas y administraciones puedan prestar los servicios que los ciudadanos demandan dentro de ese contexto.

Para alcanzar los escenarios mencionados, el proyecto mIO!, perteneciente al programa nacional CENIT del año 2010, tiene como principal objetivo potenciar las tecnologías que permitan prestar servicios ubicuos en un entorno inteligente, adaptado a cada individuo y a su contexto, usando el terminal móvil como base de interacción, tanto con servicios proporcionados por las empresas, como con aquellos creados y prestados por los propios usuarios en movilidad. Para ello, el proyecto desarrolla varias actividades que se articulan fundamentalmente sobre los cinco grandes pilares mostrados en la Figura 3.5, que se describen a continuación [Alcarria et al., 2010].

- **Inteligencia Ambiental y Gestión del Contexto.** La inteligencia ambiental se puede definir como un conjunto de tecnologías que hacen a los servicios inteligentes, al anticipar los gustos, preferencias y necesidades de los usuarios. Su objetivo es facilitar las relaciones de los usuarios con su entorno (ciudad, empresa, ocio, etc.) de un modo natural y sencillo, aprovechando las capacidades tecnológicas de computación y comunicación que ofrecen los dispositivos: móvil, red, entorno. Dentro del proyecto mIO! se investiga el conjunto de tecnologías que faciliten y permitan dotar de inteligencia a una nueva generación de servicios (denominados **servicios mIO!**) para que puedan adaptarse y anticiparse a los gustos, preferencias y necesidades de los usuarios.
- **Tecnologías de Interfaces de Acceso.** Esta actividad investiga nuevos elementos hardware, como interfaces inmersivas, controladores táctiles, sensores de movimiento, navegación sobre servicios táctiles en función de presión; así como las tecnologías necesarias para conectar al usuario a los nuevos servicios alojados en el mundo virtual *metaverse*, mediante interfaces gestuales, emocionales, realidad aumentada y teniendo en cuenta la usabilidad de estas nuevas interfaces.
- **Entorno Tecnológico para el Usuario en Movilidad.** Desarrolla la tecnología necesaria para que el usuario pueda crear servicios móviles sencillos, denominados microservicios, sensibles a su entorno, personalizables en función del perfil de cada actor que interactúe con ellos, relevantes para grupos/comunidades concretos y dinámicos en cuanto a la inmediatez en la recepción/creación de los mismos. Además, se explora el concepto del individuo como servidor móvil, ofreciendo API específicos de acceso a las capacidades del terminal.
- **Servicios en Entornos Tecnológicos Inteligentes.** Lleva a cabo la evaluación de tecnologías para la prestación de servicios por la empresa bajo el nuevo paradigma de movilidad, que incorpora nuevos escenarios para la interacción entre empresas e individuos, en contrapartida a los tradicionales (tienda, oficina). Para ello, define un marco genérico para la prestación de servicios, y estudia las tecnologías específicas de varios entornos que se suponen significativos y con potencial para el desarrollo de servicios inteligentes y en los que las empresas puedan poner sus capacidades, a través de API abiertas que estén a disposición de los usuarios.
- **Nuevas Tecnologías en Infraestructura Inteligente.** En las actividades anteriores se estudia aquellas tecnologías básicas que deben permitir el enriquecimiento de la oferta de servicios. Sin embargo, para poder garantizar y facilitar su posterior implantación hay que establecer las bases necesarias, que permitan el traslado de la innovación desarrollada al tejido productivo. En este sentido, esta actividad está orientada a sentar los fundamentos sobre los que se desarrolla la futura infraestructura, para que sea capaz de ofrecer este nuevo universo de servicios.
- **Tecnologías de Comunicación y Conectividad.** Analiza el abanico de tecnologías de comunicaciones que rodea al usuario, proponiendo nuevos mecanismos que abstraigan la complejidad que pueda existir ante la presencia de numerosas y dispares alternativas de conectividad. Se facilita el acceso a los servicios embebidos en el entorno inteligente que rodea al usuario, así como a los dispositivos externos que puedan actuar como interfaces adaptadas, mejorando la calidad de los servicios.

- **Escenarios y Validación Tecnológica.** Propone un escenario común al proyecto que permite coordinar, desde una perspectiva única, aquellos activos experimentales que se desarrollan en el resto de actividades, asegurando que se alineen con el escenario global propuesto.

De las actividades descritas, la denominada como **Tecnologías de Comunicación y Conectividad** involucra diversas tareas relacionadas con la gestión de las alternativas de conectividad que rodean al usuario, así como la elección de la más adecuada a su contexto, lo que guarda una estrecha relación con las aportaciones realizadas en la Tesis.

3.3.1. Tecnologías de comunicación y conectividad

El sector de la movilidad está explorando nuevos conceptos, gracias a las nuevas tecnologías de conectividad. Los móviles ya no solo se usan para los fines que fueron concebidos inicialmente (llamadas de voz, mensajes, etc.). Se están abriendo las puertas a un nuevo concepto de terminal móvil, en el que éste deja de ser un mero instrumento que comunica personas entre sí, para pasar a ser el ente que permite interactuar a las personas con su entorno y actuar como llave de acceso a nuevos servicios. Este proceso no es ajeno a los cambios en la concepción del servicio, inicialmente centrado en los datos, que pasa a estar articulado en torno al usuario. En el paradigma de los servicios centrados en el usuario [Watters y Shepherd, 1994], éste no sólo demanda información sino que requiere servicios, y el terminal móvil se convierte en su puerta de acceso.

El teléfono móvil se ha convertido en un elemento de uso común en la vida cotidiana, habiéndose alterado radicalmente hasta las propias necesidades y maneras de comunicación. Cada nueva generación de dispositivos ha ido incorporando nuevas capacidades, entre las que se encuentran la conectividad que proporcionan las tecnologías inalámbricas. Estas incluyen el acceso de alta velocidad a Internet en movilidad (la evolución desde GSM a HSPA y, actualmente, LTE), la localización (por identificador de celda o GPS), las comunicaciones por proximidad e identificación (NFC, RFID), las interfaces alternativas de telefonía móvil-fija y banda ancha (Wi-Fi para datos, DVB-H para televisión) y las interfaces con redes de sensores (Zigbee) o Internet de las Cosas.

3.3.2. Gestor de Comunicaciones

La diversidad tecnológica descrita anteriormente pone de manifiesto la importancia de definir una arquitectura de comunicaciones capaz de gestionar de manera eficiente e inteligente los recursos disponibles en el terminal. Por ello, en el ámbito del proyecto mIO! se diseña un middleware cognitivo, denominado **Gestor de Comunicaciones (GC)**, para proporcionar los mecanismos y herramientas necesarios para la selección, en tiempo real y de forma transparente al usuario, de la tecnología de comunicación más apropiada para acceder a los servicios mIO!, en función del entorno, las preferencias del usuario y los recursos multi-radio de los terminales, así como de las necesidades de los servicios demandados. El GC, haciendo un uso inteligente de la información de contexto, gestionará las diferentes tecnologías de acceso con las que estén equipados los terminales del usuario mediante algoritmos de control de admisión de las llamadas, de selección de las interfaces inalámbricas o de decisión del traspaso entre las diferentes tecnologías de comunicaciones. De esta forma se consigue garantizar, por ejemplo, la calidad de servicio demandada por los usuarios móviles o la distribución equitativa de carga entre las múltiples redes heterogéneas disponibles.

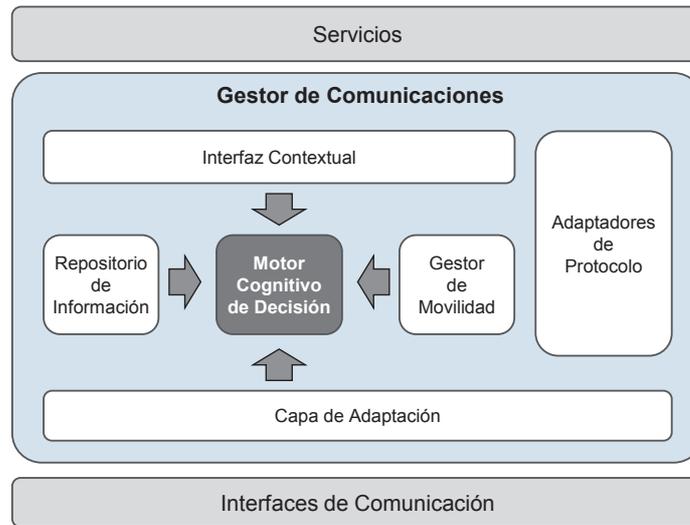


Figura 3.6: Diagrama funcional de la arquitectura del Gestor de Comunicaciones

Tal como se muestra en la Figura 3.6, la arquitectura propuesta tiene una estructura modular en la que cada uno de los componentes se encarga de las diferentes funciones previstas para el Gestor de Comunicaciones [Sánchez et al., 2010].

1. **Capa de Adaptación.** Este módulo es el encargado de unificar el acceso a las diferentes interfaces de comunicación con las que el terminal multi-radio pueda estar equipado. De esta manera, el resto de componentes de la arquitectura tendrán una única interfaz software con la que interactuar, tanto a nivel de control como a nivel de plano de datos. Mientras que el plano de control se encarga de extraer información relevante de las diferentes tecnologías de acceso disponibles y los mecanismos nativos que incorporan para el manejo de los flujos de datos, el plano de usuario gestiona de manera transparente los paquetes, de forma que sean procesados de la manera más adecuada en cada momento (por ejemplo, emplear la mejor interfaz radio disponible). Está constituido por las dos entidades que se describen a continuación.
 - **Adaptadores de Recursos.** Se trata de módulos específicos que interactúan directamente con cada una de las interfaces de comunicaciones. Son los encargados de transformar los comandos genéricos del GC en primitivas específicas de la interfaz correspondiente. Asimismo, son los encargados de recoger las estadísticas de cada interfaz.
 - **Gestor de Adaptadores de Recursos.** Se encarga de coordinar los distintos Adaptadores de Recursos que existen en un terminal. Realiza varias funciones: implementa comandos genéricos que permiten intervenir en el proceso tradicional de envío y recepción de tráfico; gestiona los diferentes flujos de datos, dirigiéndolos hacia la interfaz de salida más adecuada; y exporta, a través de una interfaz única, las estadísticas relacionadas con las interfaces radio. Algunas de las modalidades de gestión que se pueden implementar en este módulo son las relacionadas con la multiplexación simultánea del tráfico sobre varias interfaces de red; la asignación de los flujos de tráfico a la interfaz de red especificada por el Motor Cognitivo de Decisión; la priorización de flujos de tráfico; o la aplicación de técnicas de mejora

propias de las interfaces de comunicaciones (Ej. QoS basado en IEEE 802.11e), entre otras.

2. **Motor Cognitivo de Decisión.** Es uno de los módulos más importantes de la arquitectura, ya que aloja la inteligencia del GC. Decide cuál es la interfaz de comunicaciones más adecuada para cursar un determinado servicio. Para ello, se basa en dos entidades; la primera de ellas guarda relación con los requisitos de los servicios, Módulo de Calidad de Servicio, mientras que la segunda, tiene conocimiento de los recursos de comunicación del terminal, Gestor de Recursos Radio.
 - **Módulo de Calidad de Servicio.** Realiza la toma de decisiones, basándose en las entradas provenientes de los servicios, gestor de contexto, preferencias, perfiles de usuario, etc. Procesa toda esta información y selecciona el subconjunto de requisitos que necesariamente deben ser “mapeados” sobre los recursos disponibles de las interfaces de red a través del Gestor de Recursos Radio. Si es necesario, activará los Adaptadores de Protocolo necesarios para satisfacer los requisitos que no han sido seleccionados. Este módulo desconoce las características de todas las interfaces de comunicación y, por tanto, se basa en la información proporcionada por el Gestor de Recursos Radio. Por su parte, y gracias a mecanismos de inferencia y aprendizaje, el módulo de Calidad de Servicio será capaz de adaptar sus decisiones dinámicamente.
 - **Gestor de Recursos Radio.** Es el encargado de asignar y coordinar los recursos de comunicación del terminal móvil en función de las especificaciones definidas en el módulo de Calidad de Servicio, y del conocimiento que posee acerca de las capacidades del terminal. Para ello, obtiene toda la información acerca de los recursos radio a través de la Capa de Adaptación; seleccionando luego la interfaz, o conjunto de interfaces, óptima y asignando los recursos radio que sean necesarios, imponiendo a la Capa de Adaptación la modalidad de gestión a emplear. Esto permite al Gestor de Recursos Radio proporcionar un tratamiento individualizado a cada flujo de datos, asignándoles de manera óptima los recursos que, en la medida de lo posible, cumplan los requisitos exigidos.
3. **Adaptadores de Protocolo.** Operan en el plano de datos de la arquitectura y se encargan de aquellas funcionalidades que puedan ser necesarias para soportar los requerimientos impuestos, bien por el usuario o por los servicios, y que no sean soportadas de manera nativa por las tecnologías de red detectadas por el GC. Algunos ejemplos pueden ser seguridad (cifrado y autenticación), compresión de datos, corrección de errores, etc. En todo momento el Gestor de Recursos Radio intentará utilizar las funciones que ofrece nativamente la interfaz de red para satisfacer la demanda del Motor Cognitivo de Decisión, pero si eso no fuera posible, y si existiera algún Adaptador de Protocolo apropiado, el Motor Cognitivo de Decisión lo activará, para cumplir con el requisito impuesto por el servicio.
4. **Repositorios de Información.** Es el componente encargado de registrar cualquier tipo de información que necesiten el resto de módulos. Si el Motor Cognitivo de Decisión es la inteligencia del gestor, el Repositorio de Información viene a ser la memoria del mismo. Principalmente se almacenan dos tipos de datos de fuentes distintas. Por una parte están aquellos relacionados con el estado de las comunicaciones, obtenidas de

la Capa de Adaptación y, por otra parte, también se considera cualquier otro tipo de información no relacionada directamente con las comunicaciones, como el perfil o las preferencias del usuario, proporcionada por fuentes externas al gestor.

5. **Módulo de gestión de la Movilidad.** Define un marco lo suficientemente flexible como para adoptar cualquier solución de movilidad, creando para ello interfaces software genéricas que faciliten su integración. La solución de movilidad que mejor se adapta al GC es aquella que se basa en el principio de trasposos asistidos desde el terminal. En este tipo de arquitectura, la gestión de la movilidad se realiza principalmente en la red, pero ésta cuenta con la colaboración por parte del terminal móvil. En el caso en que una de las peticiones del Motor Cognitivo de Decisión implique un cambio de red de acceso, el módulo de movilidad alojado en el terminal informará al de la red, de forma que la provisión del servicio pueda continuar de manera transparente.
6. **Interfaz Contextual.** Gran parte de la información que el GC necesita, para gestionar de manera inteligente los flujos de datos, proviene de los requisitos del usuario, de la infraestructura que le rodea en un momento dado o de los servicios a los que corresponden esos flujos. Todos estos datos se adquieren a través de este módulo. Además, el propio GC se puede convertir en un proveedor de información para otras entidades del proyecto mIO!. En este sentido, y de forma genérica, el componente Interfaz Contextual interactúa con el proceso de la estructura mIO! encargado de la gestión del contexto, tanto para obtener información como para proporcionársela, si fuera necesario.

4

Capítulo

Metodología de Análisis

En los escenarios de redes inalámbricas que existen actualmente se presenta un amplio abanico de elementos, tales como usuarios, infraestructuras de acceso, operadores, etc., cada uno de ellos con una característica particular, proporcionando un comportamiento singular a cada entorno de red. Con el objetivo de abarcar una amplia variedad de escenarios, dentro de los que se implementarán los procesos de selección de acceso, se ha seguido una metodología de análisis fundamentada en dos tipos de modelado, cada una de ellas con diferente objetivo pero manteniendo una estrecha relación entre ellas. Ambos enfoques hacen uso de abstracciones genéricas de dichos elementos, en base a sus características inherentes, lo que les confiere la flexibilidad necesaria para incorporar nuevas entidades si fuera necesario. También pretenden modelar las características más relevantes de los escenarios reales, mimetizando su comportamiento en la mayor medida posible, y representando la interacción que existe entre los diferentes elementos relacionados con la red y el usuario.

Por una parte se propone un modelo, basado en los eventos producidos dentro del escenario, que pretende establecer la mejor alternativa de acceso para un usuario que necesite hacer uso de la red en un instante temporal específico. Aunque con ella se obtiene una decisión adecuada desde la perspectiva de cada usuario, no se puede determinar si dicha solución logra acercarse al rendimiento óptimo que se podría obtener para todo el sistema bajo estudio. Con ese objetivo se plantea un segundo modelo, que permite estudiar el mismo escenario mediante un análisis discreto en el tiempo, con un enfoque más global, que persigue establecer el rendimiento óptimo para todo el sistema. Esto serviría como marco comparativo para determinar en qué medida los resultados obtenidos con mCASE son mejorables.

Debido a que las entidades de red que pueden proporcionar conectividad a un usuario presentan características claramente diferenciadas, en este documento se utiliza el término **elemento de acceso** (*Access Element*, AE) para referirse genéricamente a cualquiera de ellas, pudiendo ser, por ejemplo, una estación base GSM o un punto de acceso Wi-Fi.

4.1. Modelo orientado a la mejora local del sistema

Los procesos de selección de acceso se caracterizan por ser invocados de forma asíncrona, ante eventos generados por el usuario cuando surge la necesidad de establecer conexiones con un AE, ya sea para cursar un servicio, mejorar la calidad del servicio que se está cursando, evitar la interrupción del mismo por la inminente pérdida de cobertura con el AE actual, entre otros. En este sentido, se propone un modelo, denominado *multi-Constraint Access Selection in heterogeneous Environments* (**mCASE**), basado en un sistema que permite gestionar dichos eventos. Ante cada suceso que requiera una asignación de recursos, se busca el mejor

acceso posible para el usuario que lo solicita, de acuerdo a la información con que se cuenta en el momento de tomar la decisión. Debido a ello se puede decir que este modelo tiene una naturaleza “local”, esto es, limitada al usuario, en tanto en cuanto éste no podrá conocer las posibles consecuencias de su decisión sobre los demás usuarios o elementos de la red. Por otra parte, también se modelan los comportamientos de las principales entidades involucradas (usuarios, red, servicios, etc.), de una manera flexible y escalable, con el objetivo de hacer frente a los exigentes requerimientos de los escenarios a considerar.

4.1.1. Descripción del modelo mCASE

El modelo mCASE está constituido por diversas entidades, relacionadas entre sí, y que cumplen un papel específico. Tal como se muestra en la Figura 4.1, *Scenario* es la entidad principal y representa el entorno en el que se agrupan todos los elementos que forman parte del proceso de selección de acceso. Esto le permite mantener un control centralizado de todas las demás entidades, así como gestionar directamente la interacción entre ellas. La entidad *Terminal* representa a los dispositivos que el usuario utiliza para hacer uso de los servicios. El usuario está representado a su vez por la entidad *User*, a través de la cual se pueden modelar diversos tipos de usuarios, en base a sus requerimientos de QoS, predisposición económica, etc. A cada usuario se le asocia un único tipo de terminal, pero ambas entidades mantienen sus propias propiedades. Dentro de ellas, un elemento importante es el RAT (*Radio Access Technology*), que modela la tecnología de acceso radio que incorporan los dispositivos.

Por otra parte, están las entidades que representan a los elementos de acceso (*AE*). Se ha decidido que un AE incorpore una única RAT, mientras que un terminal puede soportar más de una. Otro elemento que caracteriza a los AE es la entidad *Operator*, que emula el operador de red que despliega y gestiona los AE. Mientras que cada AE pertenece a un único operador, estos pueden tener asociado un conjunto de elementos de acceso, incluyendo varios tipos. Finalmente, para poder analizar situaciones en las que un terminal tiene que llevar a cabo un traspaso entre AE de diferentes operadores, y asumiendo que existan políticas que permitan la interacción entre ellos, se utiliza la entidad *Access Broker*, que se encargará de gestionar adecuadamente las estrategias cooperativas entre operadores. Así, mCASE no está diseñado únicamente para replicar un entorno **multi-RAT**, sino también permite analizar escenario **multi-operador**.

Cada entidad que forma parte de mCASE incorpora una serie de propiedades que permiten modelar los elementos que se encuentran involucrados dentro de un proceso de selección de acceso. La Figura 4.2 muestra dichas entidades con sus respectivas propiedades, así como las relaciones que se establecen entre ellas. Todo el conjunto de entidades y parámetros que definen un escenario, en el contexto de mCASE, se especifican a través del fichero de configuración denominado *mCASE.cfg*, cuya estructura se describirá en la Sección 5.2.5.

Cada tecnología radio se modela a través de la entidad RAT, caracterizada por el radio de su área de cobertura (*Range*) y por la carga total que puede soportar (*Capacity*). La posibilidad de utilizar diferentes tipos de RAT permite crear, por ejemplo, escenarios urbanos con una amplia variedad de tecnologías radio o, por otra parte, escenarios rurales en los que existen, por ejemplo, un número reducido de estaciones base de tipo celular (GSM) y algunas más del tipo WLAN. Los diferentes tipos de terminales se implementan a través de la entidad *Terminal*, cuya propiedad *Probability* permite indicar el porcentaje de cada tipo de dispositivo en el escenario. Como cada tipo de terminal se diferencia por los RAT que incorpora (especificado mediante la lista de *RATid*), se pueden incluir una variada gama de terminales, en función de la tecnología radio que incorporen. De forma similar, la propiedad

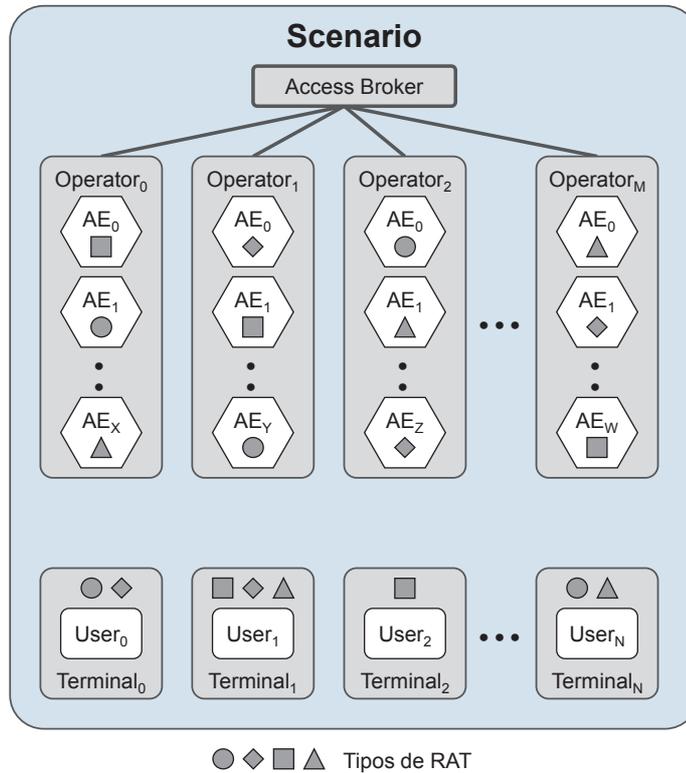


Figura 4.1: Arquitectura funcional de mCASE

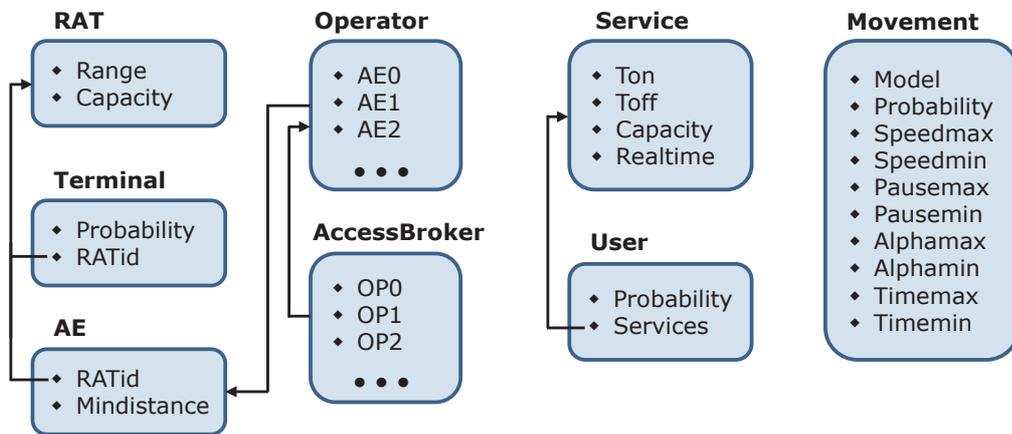


Figura 4.2: Entidades de mCASE

Probability de la entidad User se utiliza para especificar el porcentaje de cada tipo de usuario en el escenario. Éstos se caracterizan por los servicios que pueden utilizar, permitiendo de esta forma incorporar usuarios con diferentes requerimientos de tráfico. La asociación entre un determinado usuario con un terminal específico da como resultado la creación de la entidad User Terminal (UT), que permite implementar usuarios con diferentes necesidades de tráfico y conectividad, como podría ser el caso de un ejecutivo que haga uso de servicios avanzados de videoconferencia a través de una conexión, mientras que sincroniza sus datos con la nube

a través de otra; o un usuario doméstico, que haga uso de servicios menos exigentes, como utilizar únicamente el navegador.

En cuanto a los servicios asociados a cada tipo de usuario, cada uno de ellos está representado a través de la entidad *Service*, definida mediante las propiedades: tiempo de actividad (*Ton*), tiempo de reposo (*Toff*), recursos necesarios (*Capacity*) y requisitos de tiempo real (*RealTime*). De esta manera, se pueden modelar diferentes tipos de servicios, tales como video, voz y datos. Finalmente, mCASE ofrece la posibilidad de que cada usuario emplee diferentes patrones de movimiento. Esto permite incorporar al escenario usuarios que pueden ir en vehículos, u otros que se desplazan como peatones. Para ello se usa la entidad *Movement*, con un gran número de propiedades, permitiendo implementar diversos patrones de movimiento, como el conocido *Random WayPoint* y sus variantes [Camp et al., 2002].

Con respecto a los elementos de acceso, cada una de ellos está representado por la entidad AE. Como ya se ha dicho, estos incorporan un único RAT y, mediante la propiedad *MinDistance*, se puede controlar su despliegue, pues permite asegurar una distancia mínima entre AE del mismo tipo. Por otra parte, cada operador gestiona un conjunto de AE diferentes, lo que permite desplegar escenarios muy diversos, como el de un operador incumbente con un mayor número de AE de tipo celular y otros menos tradicionales, que basan su negocio en el despliegue de elementos de acceso de tipo WLAN o WiMAX. En cualquier caso, como ya se ha mencionado, cuando dos operadores se ven involucrados en el proceso de traspaso de un usuario, entra en juego la entidad *Access Broker*, que integra a todos los operadores que forman parte del escenario, e implementa las políticas y algoritmos que han de regir la relación entre operadores.

4.1.2. Estructura lógica del modelo

El diseño de mCASE presenta una estructura modular, que permite añadir nuevos componentes con la finalidad de incorporar al modelo funcionalidades adicionales que permitan mejorar sus prestaciones; o modificar los ya existentes, para adaptar su funcionalidad de manera sencilla. Tal como se muestra en la Figura 4.3, mCASE está constituido por las fases descritas a continuación.

- **Despliegue de Usuarios/Terminales.** Durante esta fase se crean las entidades UT que formarán parte del escenario. A cada terminal se le asigna un identificador único, estableciendo el tipo al que pertenece y el tipo de usuario asociado con él. También se define el operador con el que mantiene un relación preferencial, y el patrón de movimiento que seguirá el usuario correspondiente. El tipo de terminal se asigna mediante una variable aleatoria uniforme, en base a las probabilidades asignadas a cada tipo de terminal. De manera similar se procede con la asignación de los tipos de usuario y movimiento. El tipo de operador también se establece mediante el mismo mecanismo, pero en base a las probabilidades que establece el parámetro *MarketShare*, que permite especificar la distribución del mercado entre operadores, de tal forma que se puedan reflejar situaciones diversas, como la de un operador incumbente con una mayor cuota de mercado en comparación con un operador novel. Finalmente, en función del tipo correspondiente, a cada usuario se le fija el precio máximo que está dispuesto a pagar por un servicio.
- **Despliegue de Elementos de Acceso.** Para el despliegue de los elementos de acceso se crean las correspondientes entidades AE. A cada una se le asigna un identificador único, que determina el tipo de AE y el operador al que pertenece. Como cada operador

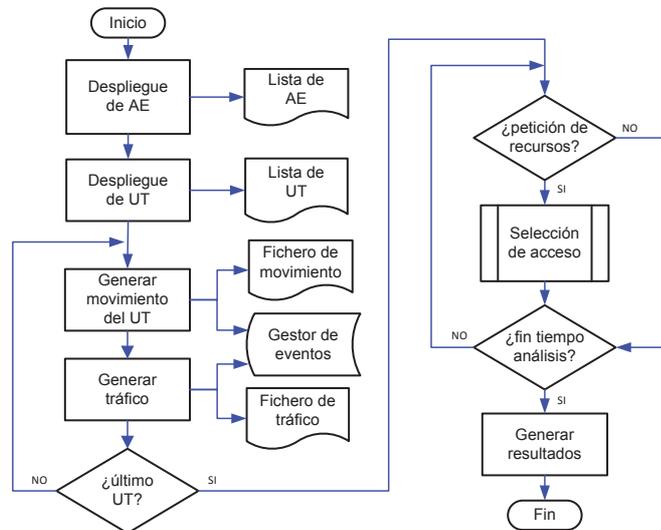


Figura 4.3: Estructura lógica de mCASE

tiene asignado un número específico de elementos de acceso para cada tipo, el despliegue consiste básicamente en asignar su posición dentro del área bajo estudio. El despliegue puede realizarse de forma aleatoria o siguiendo una determinada planificación. En cualquier caso, cada operador podría establecer una distancia mínima entre los elementos de acceso que pertenezcan al mismo tipo, de acuerdo al parámetro *MinDistance*.

- Creación de patrones de movimiento y servicios.** Entre los eventos que gestiona el modelo mCASE se encuentran aquellos que establecen el movimiento de los usuarios, así como aquellos que modelan los servicios invocados por los usuarios. Ante cada evento de movimiento se define la nueva trayectoria que seguirá el usuario, en función de los parámetros que lo caracterizan (identificador, posiciones inicial y final, dirección, velocidad, etc.). De manera similar, cada tipo de usuario tiene asignado un conjunto de servicios, cada uno siguiendo patrones de tráfico diferentes. Los eventos de servicios se generan en función de los parámetros que lo caracterizan (principalmente los tiempos de actividad y reposo), activando o desactivando la generación de tráfico en esos instantes de tiempo.
- Proceso de análisis.** Los eventos generados durante la fase de despliegue son almacenados en el gestor de eventos de mCASE, en orden cronológico en base al tiempo en el cual deben ser ejecutados. En un inicio se selecciona el primer evento de la cola, ejecutándose la tarea correspondiente. Dependiendo del tipo de evento, se podrían generar otros que actuarían posteriormente, por lo que serían almacenados de igual forma en la cola de eventos en su respectiva posición cronológica. Los eventos que indican el inicio de un servicio son un caso especial, ya que implícitamente derivan en la solicitud de recursos a un AE. Por tanto, estos eventos inician el proceso de selección de acceso, que será explicado en la siguiente sección. Cuando todos los eventos hayan sido atendidos o se haya alcanzado el tiempo límite del proceso de análisis, se recogen las estadísticas correspondientes en los ficheros de salida para su posterior estudio.

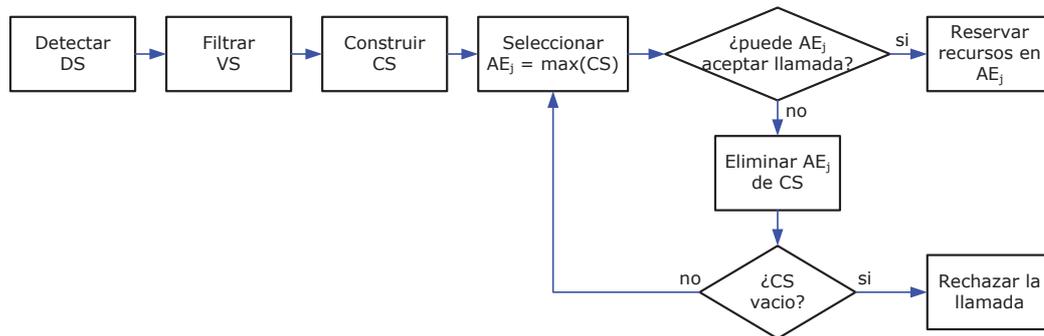


Figura 4.4: Proceso de selección de acceso

4.1.3. Proceso de selección de acceso

Cuando un servicio asignado a un UT pasa al estado activo, comienza a generar tráfico, de acuerdo a sus características. Debido a ello es necesario solicitar recursos a la red para satisfacer los requerimientos correspondientes, iniciándose por tanto un proceso de selección de acceso. Aunque éste es la situación más representativa de una petición de recursos, no es la única. Para un servicio que ya está siendo cursado, eventos como salir de la cobertura del AE con el que está conectado o buscar mejores alternativas de acceso mientras que esté activo, hacen que también se ejecute el proceso de selección de acceso. La estrategia utilizada para este proceso ha surgido de las ideas planteadas en las arquitecturas de referencia estudiadas en el Capítulo 3, y consiste en las fases descritas a continuación (ver Figura 4.4):

- **Detección de accesos.** Se determinan los AE en cuyas coberturas se encuentra el usuario, en base a su posición dentro del escenario. En esta fase, no se tiene en cuenta el tipo de operador al que pertenecen, o la disponibilidad de recursos para satisfacer el servicio. Esto es, se construye un conjunto de AE teniendo en cuenta únicamente la conectividad física con el terminal, denominado **Conjunto Detectado** (*Detected Set*, DS).
- **Validación de accesos.** En esta fase se aplican diversas políticas que pueden tener los operadores, sobre los AE detectados en el paso anterior. Dependiendo de la política aplicada, el DS puede verse reducido, eliminando aquellos AE que no la cumplan, o influir en el valor que debe adoptar algún parámetro para ajustarse a una política concreta. Así, por ejemplo, puede que un operador aplique un determinado esquema de seguridad que el terminal no pueda cumplir y, por consiguiente, el AE correspondiente tendría que ser eliminado del DS. Otra posibilidad es que el operador aplique políticas de precio en función de la carga actual del AE, que actualizará la tarifa ofrecida al usuario, aspecto que será tenido en cuenta por éste a la hora de tomar un decisión. En resumen, en esta fase se refina el DS, validando los diversos parámetros de los AE seleccionados, estableciendo de esta forma el denominado **Conjunto Validado** (*Validated Set*, VS).
- **Accesos Candidatos.** La inteligencia del proceso de selección de acceso reside en esta fase. A cada elemento de acceso del VS se le asigna una valoración, que depende del procedimiento de selección de acceso utilizado en el análisis. El modelo mCASE es lo suficientemente flexible para incorporar diversos algoritmos de selección de acceso, tales como aquellos basados en las herramientas matemáticas descritas en la Sección 2.4.3.

Por defecto, el modelo incluye un algoritmo basado en la teoría de la utilidad, en base a la cual a cada AE del VS se le otorga una utilidad en función de los criterios y pesos considerados en la estrategia de selección de acceso. Los criterios representan los requisitos, tanto del usuario como de la red, mientras que los pesos permiten modular la relevancia de cada criterio, de acuerdo a la estrategia de selección de acceso adoptada. Este enfoque es bastante genérico y flexible y, por lo tanto, se puede adaptar a fin de implementar una amplia gama de estrategias de decisión. En particular, a todos los elementos de acceso validados se les otorga una puntuación total en base a la expresión que se muestra en 4.1:

$$\Phi_{ij} = \sum_{m=1}^M \omega_m \cdot (f_{ij})_m \quad (4.1)$$

donde Φ_{ij} es la función que proporciona la utilidad agregada del elemento de acceso j con respecto al usuario i , ω_m es el peso del m -ésimo criterio y $(f_{ij})_m$ es la función que brinda la utilidad de cada uno de los M criterios considerados dentro de la estrategia de selección de acceso. Con el objetivo de limitar los valores de Φ_{ij} dentro del intervalo $[0,1]$, todas las funciones de utilidad se diseñan de tal forma que proporcionen valores dentro del mismo intervalo (ver Sección 4.1.4), asignándose valores a los pesos de tal forma que $\sum_{m=1}^M \omega_m = 1$.

El resultado de esta fase es un conjunto de AE ordenados de forma descendente en función de la valoración obtenida por el algoritmo aplicado. Cada uno de los AE de dicho conjunto es un candidato potencial a ser elegido como la mejor alternativa de acceso para cursar el servicio del usuario, por lo que recibe el nombre de **Conjunto Candidato** (*Candidate Set*, CS).

- **Acceso Seleccionado.** Para determinar el AE que atenderá finalmente la solicitud de recursos realizada por el servicio, se interroga cada elemento de acceso del CS, empezando por el que obtuvo una mayor utilidad, para averiguar si dispone de los recursos necesarios. Si es así, se reservan los recursos correspondientes en dicho AE y, en caso contrario, se continúa con el siguiente elemento de acceso del CS. Si se llegara a interrogar a todos sin que ninguno satisfaga la capacidad necesaria, se rechazaría la solicitud de conexión, entendiendo que el terminal no tiene a su alcance ningún AE capaz de atender adecuadamente la demanda del servicio.

4.1.4. Modelado de las funciones de utilidad para mCASE

Los diversos criterios, provenientes tanto desde la perspectiva de la red como del usuario, que pueden ser incluidos en la función de utilidad agregada mostrada en la Ecuación (4.1), se modelan a través de utilidades individuales. Para ello se emplean funciones matemáticas que reflejan, a través de sus propiedades, el comportamiento que adoptan dichos criterios. Así, la función de utilidad determina el beneficio de una conexión, desde el punto de vista de un determinado criterio. En la literatura existe un amplio abanico de factores que han sido utilizados durante los procesos de selección de acceso. En el ámbito de esta Tesis se considerará un conjunto de criterios, involucrados en los escenarios de selección de acceso que serán estudiados en el Capítulo 6.

En este apartado se describe únicamente el modelado de las funciones de utilidad de forma individual, es decir, sin considerar la relación que pueda existir entre ellas. Dicho análisis

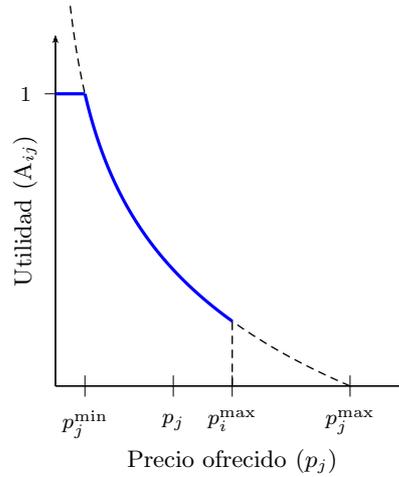


Figura 4.5: Función de utilidad del criterio de precio

formará parte del estudio que se realizará en Capítulo 6, en el que se podrá observar cómo las diferentes combinaciones de estos factores dan lugar a rendimientos que ponen de manifiesto la importancia de un adecuado ajuste de los parámetros involucrados en las funciones de utilidad.

Criterio de Precio

El objetivo de este criterio es reflejar la preferencia de los usuarios por las alternativas más económicas. Para ello, la utilidad debe incrementar su valor a medida que el elemento de acceso ofrece precios más bajos, por lo que se busca una función decreciente. Una alternativa sencilla es hacer uso de una función triangular, tal como se hizo en [Choque et al., 2011c]. Esta aproximación tiene la desventaja que una misma variación absoluta en el precio conlleva al mismo cambio en la función de utilidad, impidiendo comparar alternativas de acceso basándose en la diferencia relativa entre sus tarifas. Para superar esta limitación, se ha optado por el uso de una función logarítmica (ver Figura 4.5), que representa la utilidad (A_{ij}) que el usuario i percibe, en base al precio ofrecido por el AE j (p_j), cuya formulación matemática se define como:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & p_j < p_j^{\min} \\ -\log(p_j) & p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{\max} \end{cases} \quad (4.2)$$

donde p_j^{\min} y p_j^{\max} se corresponden, respectivamente, con el menor y mayor precio que el AE j tarifica por el uso de sus recursos. Considerando que un usuario no aceptará utilizar un elemento de acceso con un precio mayor al que esta dispuesto a pagar (p_i^{\max}), la función de utilidad quedará indirectamente acotada entre $[0, p_i^{\max}]$. Requisitos como ésta se tienen en cuenta durante la validación de los accesos descrito en la Sección 4.1.3. Por otra parte, el precio es calculado en base a las unidades monetarias por tiempo y unidad de capacidad asignada al servicio.

Criterio de Traspaso

Desde la perspectiva del usuario podría parecer muy atractivo seleccionar siempre la alternativa de acceso de menor coste económico, pudiendo adoptar de esta manera decisiones

basadas únicamente en dicho criterio. Sin embargo, es evidente que los cambios de elemento de acceso pueden producir cierta sobrecarga en la conexión, debido a la señalización necesaria durante el proceso de traspaso y, por consiguiente, se podría originar una degradación en la QoS. En este sentido, el usuario podría verse tentado en mantener su conexión con el AE actual tanto como sea posible. Cabe destacar que este criterio no obliga al usuario a mantenerse necesariamente en el mismo AE, sino que añade un valor adicional (σ) a la utilidad global cuando la alternativa de acceso actual j es la misma a la que el usuario i estaba ya conectado. De esta manera se define la función de utilidad del traspaso B_{ij} como sigue:

$$B_{ij} = \begin{cases} \sigma & \text{si el usuario } i \text{ estaba conectado al AE } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.3)$$

Criterio de Carga

Este es posiblemente uno de los aspectos que en mayor medida favorecen los intereses de la red, debido a que le permite equilibrar la carga de los diversos elementos de acceso, sin tener en cuenta el operador al que pertenecen. Para ello, se considera la voluntad del operador de fomentar o disuadir al usuario de utilizar un determinado elemento de acceso, teniendo en cuenta la carga que actualmente está soportando. El objetivo es ofrecer al usuario i una mayor utilidad cuando, estando conectado a un elemento de acceso más cargado, intenta cambiar a otro, y, del mismo modo, cuando el elemento de acceso actual tiene una baja carga, otorgar una mejor utilidad a fin de fomentar que el usuario mantenga la misma conexión. Para modelar este comportamiento se utiliza una función potencial (ver Figura 4.6). Si se considera l_j como la carga relativa actual del elemento de acceso j , se define la función de utilidad de la carga Γ_{ij} como:

$$\Gamma_{ij} = \begin{cases} 1 - l_j^2 & 0 \leq l_j \leq 1 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.4)$$

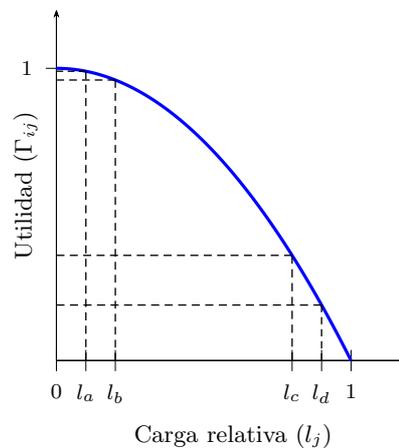


Figura 4.6: Función de utilidad del criterio de carga

Criterio de Operador Preferido

Con este criterio se pretende reflejar la predisposición que los usuarios tienen a conectarse, en caso de que sea posible, con un operador por el que muestran cierta preferencia debido, por ejemplo, a la existencia de un contrato previo con dicho operador, oferta promocional de servicios añadidos, etc. Si η_i es el identificador del operador preferido para el usuario i , dependiendo del operador (ζ_j) al que pertenece el elemento de acceso j que está siendo evaluado, se asignará una determinada utilidad, que será igual a ρ si se corresponde con el operador preferido del usuario i . La función de utilidad Δ_{ij} utilizada para modelar este criterio, se define como:

$$\Delta_{ij} = \begin{cases} \rho & \text{Si } \zeta_j = \eta_i \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.5)$$

Criterio de Calidad del Enlace

A la hora de seleccionar entre varias alternativas de acceso, uno de los parámetros que, tradicionalmente, más se emplean es la calidad del enlace radio. Evidentemente se trata de un aspecto que depende fuertemente de la tecnología subyacente, así como del modelo de propagación empleado. En general, se puede asumir que se corresponde con una función decreciente con la distancia entre el terminal del usuario i y un elemento de acceso j (d_{ij}); en este caso, se utilizará una función triangular, que tome el valor máximo (1.0) cuando el terminal se encuentra en la misma posición que el AE y el mínimo (0.0), justo en el límite de su área de cobertura (r_j). De esta forma, este criterio E_{ij} se define como:

$$E_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{d_{ij}}{r_j} & \text{si } d_{ij} < r_j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.6)$$

4.2. Modelo orientado a la optimización del sistema

Tal como se ha descrito en la sección anterior, el modelo mCASE busca, en todo momento, la mejor alternativa de acceso para los diferentes servicios que el usuario invoque. Aunque esta metodología ofrece la mejor solución “individual”, por sí misma no puede determinar en qué medida se acercan los resultados al rendimiento óptimo que puede ofrecer el escenario de manera global. Ante esta situación, algunos trabajos intentan fundamentar sus conclusiones realizando comparaciones con otros estudios con objetivos similares, pero fundamentalmente diferentes en los escenarios utilizados para obtener los resultados ([Nguyen-Vuong et al., 2008a],[Sallent et al., 2007]) o, en otros casos, bajo el mismo escenario, muestran un mejor rendimiento relativo haciendo uso de algoritmos básicos como referencia ([Giupponi et al., 2005], [de Sousa et al., 2006], [Pérez-Romero et al., 2007]). En este sentido, el modelo descrito en la presente sección, denominado *Optimum and Global Access Selection in heterogeneous Environments* (**oGASE**), pretende establecer el límite superior del rendimiento global que se puede alcanzar, haciendo uso del mismo escenario, con lo que se podrían cuantificar la diferencia de los resultados de mCASE con respecto a la solución teóricamente óptima. A diferencia del anterior modelo, centrado en el usuario, oGASE se orienta hacia la búsqueda del rendimiento óptimo para todo el escenario, estableciendo una clara distinción entre ambos enfoques.

El objetivo de oGASE es gestionar, de manera global, todos los elementos de la red, para lograr el mayor número de usuarios conectados satisfactoriamente, siempre atendiendo a las estrategias bajo las que se realiza el análisis de un determinado escenario. Dicho escenario debe ser idéntico al analizado por mCASE, por lo que uno de los primeros procedimientos a realizar es replicarlo previamente, de tal forma que oGASE adopte todos los parámetros que definen las entidades involucradas en el escenario (usuarios, AE, operadores, etc.). También se necesita conocer los patrones de tráfico generado por los servicios, así como los movimientos que los usuarios siguen durante todo el tiempo de análisis. Así, oGASE utiliza como elemento central lo denominado como **fotografía** o *snapshot*, que hace referencia a la información que se dispone de la red en un determinado instante temporal. Será a partir de esta información desde la que se conformará el problema de optimización, constituyendo cada fotografía una unidad básica de optimización.

Por otra parte, teniendo en cuenta que un usuario puede tener varios servicios ejecutándose simultáneamente en un terminal, algunos de ellos pueden estar en curso, mientras que otros pueden estar inactivos, por lo que a pesar de ser servicios de un mismo usuario, a efectos del problema de optimización, se consideran siempre de forma independiente. Esta relación queda definida como el **par usuario-servicio**, constituyendo ésta la pieza básica de la optimización de una fotografía, porque es la granularidad con la que se lleva a cabo dicha optimización. Otro aspecto importante es la manera en que oGASE hace referencia a los posibles estados de un servicio en el momento de hacer frente a la optimización de una fotografía. El estado de cada servicio (activo, reposo), se conoce a priori, ya que ha sido previamente generado por mCASE, por lo que se puede decir que oGASE sabe la **intención del usuario** para un servicio. En este caso, la intención del usuario hace referencia al estado que el servicio pretende adoptar en la siguiente ranura temporal, con respecto al instante actual del proceso de optimización. Este comportamiento, de alguna manera, refleja el modelado a nivel de conexión adoptado por los servicios, por lo que se puede decir que es el usuario quien tiene la “intención” de realizar o no una llamada.

4.2.1. Descripción del modelo oGASE

Como aspecto general a destacar, respecto al modelo diseñado, es que la resolución de cada fotografía (salvo la inicial) no se realiza de forma independiente, ya que entran en juego diversos factores, como la carga de los AE, las tarifas que éstos aplican o, incluso, aspectos más básicos, como el AE con el que se había conectado previamente cada par usuario-servicio. Todos estos elementos resultarán imprescindibles para el cálculo de los coeficientes de la función objetivo durante el proceso de optimización. Por este motivo surge la necesidad de monitorizar todo lo sucedido con anterioridad en la red, por lo que el modelo oGASE se soporta sobre dos pilares fundamentales, tal como se muestra en la Figura 4.7.

Optimizador de fotografías (*Snapshot Optimizer*)

Como su nombre indica, esta entidad está encargada principalmente de llevar a cabo la optimización de cada una de las fotografías. Para ello, primero obtiene los datos sobre el escenario, con el fin de proceder a su despliegue, que servirá como marco de referencia durante la evaluación las fotografías. Para ello, se acude a los ficheros de configuración, ya sea para inicializar el escenario global o bien para conocer los cambios producidos a lo largo de la simulación. Posteriormente recurrirá a la entidad *Monitoring System* para que le aporte información acerca del resultado de la optimización de la fotografía anterior, con el fin de conocer,

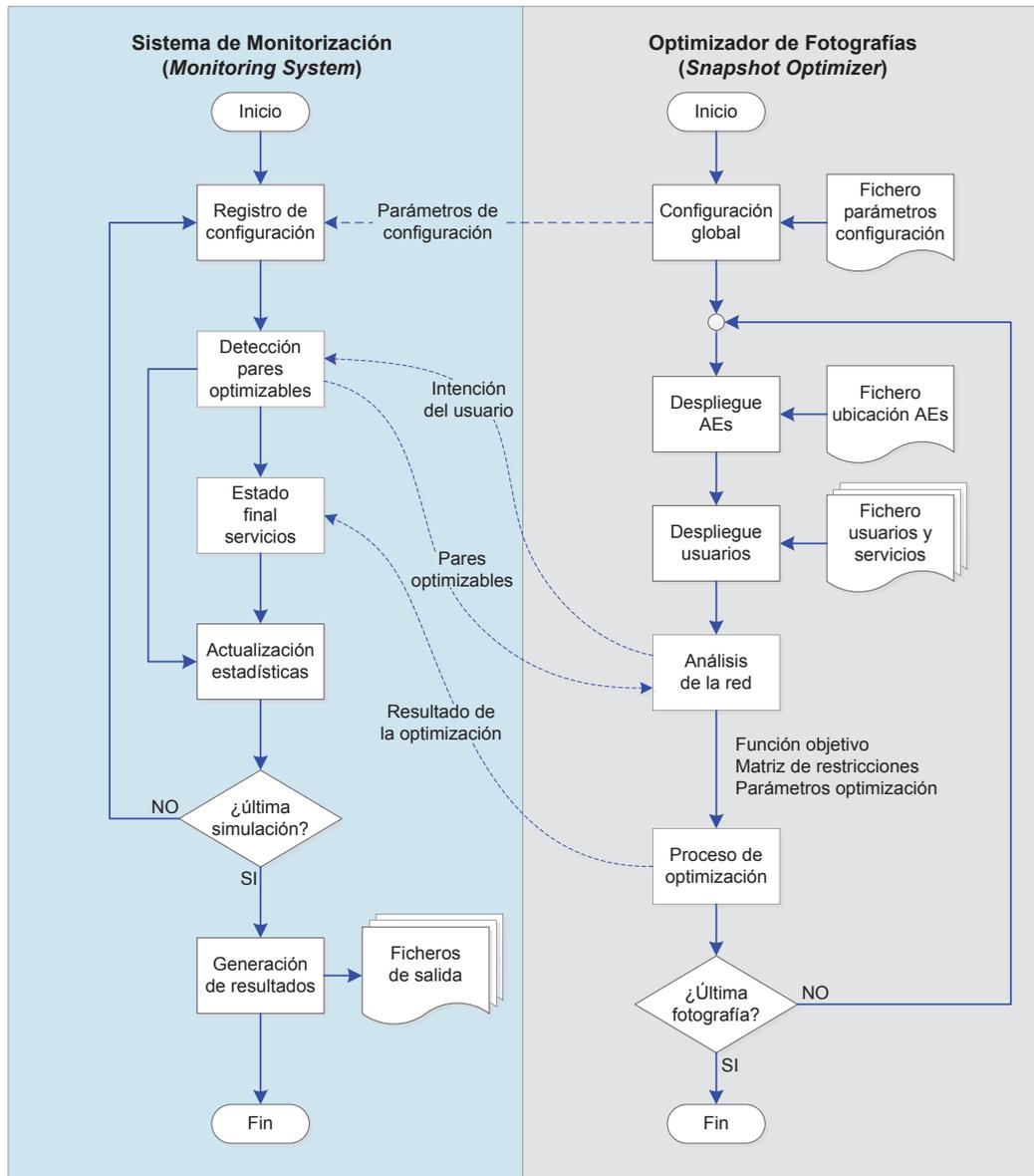


Figura 4.7: Entidades funcionales de modelo oGASE

por ejemplo, los pares usuario-servicio que deben formar parte del problema de optimización, el precio que han pagado por la conexión (para tenerlo en cuenta en el sistema de facturación del usuario), o bien la carga de los elementos de acceso (para ejecutar funciones de balanceo de carga, o para definir el precio que deben cobrar por unidad de carga). Con todos los datos recabados, tanto los provenientes de ficheros de datos y configuración, como los proporcionados por *Monitoring System*, se procede a la creación del problema de optimización, esto es, la construcción de la matriz de restricciones y la función objetivo. Mediante el uso de un *solver*, una librería matemática que permite resolver el problema de optimización, se obtienen los resultados correspondientes a cada fotografía, que posteriormente son enviados al *Monitoring System* para que puedan ser considerados en las siguientes instancias del problema, así como

en la obtención de estadísticas tras haber procesado todas las fotografías. A continuación se describen las principales fases en la operación de esta entidad.

- **Configuración del sistema.** El *Snapshot Optimizer* utiliza dos tipos de ficheros, que proporcionan información para, por una parte, construir el escenario de red y, por otra, conocer su comportamiento durante el tiempo que dura la simulación. El primer tipo de fichero, denominado *oGASE.cfg*, proporciona datos que se mantienen fijos a lo largo de toda la simulación, por lo que se cargan únicamente al inicio; incluyen además los parámetros que establecen la estrategia que se pretende utilizar en el escenario. Como uno de los objetivos de *oGASE* es reflejar el mismo escenario utilizado con *mCASE*, parte de la información proporcionada en este fichero de configuración es la misma que la especificada en *mCASE.cfg*: dimensiones del escenario, tipos de usuarios y servicios, tipos de AE y operadores, etc. El segundo conjunto de ficheros incluye aquel en el que se especifican las características de los AE utilizados en el análisis, y aquellas en las que se incluyen el comportamiento de usuarios y servicios a lo largo de la simulación. El fichero correspondiente a los AE indica sus posiciones dentro del escenario, el tipo de RAT que utilizan y el operador al que pertenecen. Como esta información no se ve modificada a lo largo de la simulación, este fichero solo se carga una sola vez en el sistema. Los ficheros correspondientes a usuarios y servicios, que reflejan el concepto de **fotografía** adoptado para el modelado, registran la posición en la que se encuentran los usuarios dentro de las dimensiones del escenario, así como el estado de los servicios que utilizan.
- **Análisis de la red.** Una vez que se tiene conocimiento de la red sobre la que se realizará el análisis, y de los usuarios que tienen intención de establecer una conexión, junto con sus posiciones, se procede a la tarea denominada análisis de la red. El objetivo es realizar un análisis previo a la resolución del problema de optimización, que consiste en, partiendo de los datos de los que se dispone, generar las estructuras que requiere el *solver* para llevar a cabo su cometido. En esta fase es necesario acudir al *Monitoring System* para averiguar los resultados de la fotografía previa, imprescindibles para formular el nuevo proceso de optimización. Una de las más importantes es conocer el AE al que estuvo conectado cada par usuario-servicio que forme parte del problema de optimización. Además, para aplicar las políticas de precios del operador, es necesario conocer la carga previa de los AE, así como también el precio que el usuario está pagando por los servicios en curso, ya que si no cambia (a lo largo de una llamada) de operador ni de tecnología de acceso, no debería modificarse su facturación. Finalmente, el *Monitoring System* deberá indicar los pares usuario-servicio que forman parte del proceso de optimización en la fotografía vigente, para construir adecuadamente la función objetivo.
- **Proceso de optimización.** Una vez obtenida la información necesaria dentro de la fase anterior, se ejecuta el proceso de optimización de cada fotografía, desde la creación del problema hasta su resolución. Para comenzar, es necesario suministrar al *solver* todos los parámetros de configuración que requiere para formular adecuadamente el problema y, por tanto, obtener los resultados esperados. Se requiere el número de usuarios, servicios y elementos de acceso, a partir de los que se establece la cantidad de variables y el número de restricciones. Posteriormente, se transfieren los límites correspondientes a las restricciones especificadas dentro del problema de optimización (ver Sección 4.2.3); estos son, la capacidad de los AE y el hecho de que un par usuario-servicio no puede estar

conectado simultáneamente a más de un AE. En base a dicha información se construye la matriz de restricciones (correspondiente a cada par usuario-servicio y a cada AE), que se envía al *solver* mediante las interfaces que proporciona. A continuación se construye la función objetivo, que consiste en obtener, para cada par usuario-servicio, el valor del coeficiente que se le va a aplicar. Posteriormente, será el *solver* el que se encargará de maximizar esta función, teniendo en cuenta las restricciones impuestas. Finalmente, se ejecuta el *solver* para encontrar la solución al problema de optimización planteado. Además, tal como se ha comentado anteriormente, los resultados del problema se envían al *Monitoring System*, que almacenará información como: pares usuario-servicio que han resultado conectados y AE correspondiente, calidad del enlace, precio abonado por la conexión, entre otros.

Sistema de Monitorización (*Monitoring System*)

Este componente cumple una doble misión. Por una parte sirve de apoyo a los procesos de optimización llevados a cabo por el *Snapshot Optimizer*, suministrándole información correspondiente a las fotografías previas y, por otra, gestiona todos los eventos que se van produciendo en la red y, de acuerdo a ellos, va almacenando datos estadísticos sobre la estrategia concreta que se esté analizando. El *Monitoring System* conocerá en todo momento el estado de la red, desde que comienza a recibir los primeros resultados hasta la iteración en la que se encuentre en cada momento; durante todo el proceso irá almacenando los datos estadísticos correspondientes a la optimización para la posterior generación de resultados. Por su parte, el *Snapshot Optimizer* no tiene conocimiento de lo que sucede más allá de los datos previos y actuales de la fotografía vigente, dejando toda la inteligencia al *Monitoring System*, que será iniciado antes que el *Snapshot Optimizer*, manteniéndose a la espera hasta que éste último comience, estableciendo un primer canal de comunicación. Estructuralmente, las funcionalidades que proporciona el *Monitoring System* se pueden resumir en tres fases bien diferenciadas, descritas a continuación.

- **Registro de la configuración del escenario.** Para que el *Monitoring System* cumpla con su objetivo, tiene que tener un conocimiento detallado de la configuración global del escenario que se va a utilizar durante el análisis. Para ello, durante la primera comunicación que se establece con el *Snapshot Optimizer*, éste le envía una serie de datos que resultarán imprescindibles para, por ejemplo, realizar el cálculo de las estadísticas al finalizar la simulación. Dicha información incluye el número de fotografías, usuarios, servicios y AE; así como, los diferentes tipos de servicios, RAT, usuarios y operadores, entre otros. En general, su finalidad principal es servir de apoyo al sistema de estadísticas, cuya vigencia se extiende a lo largo de toda la simulación, esto es, hasta que se procesen todas las fotografías.
- **Análisis del estado de los servicios.** Durante el despliegue de AE y usuarios, que realiza el *Snapshot Optimizer*, se interpreta la intención que tiene cada par usuario-servicio de conectarse en cada fotografía. Dicha información se envía al *Monitoring System* para que, partiendo del estado previo (almacenado de la fotografía anterior), se determine cuáles de los pares usuario-servicio que están en situación de ser optimizados. En la Sección 4.2.2, se describen los estados en los que pueden encontrarse los servicios involucrados en el problema. En este caso, el *Monitoring System* considera que podrían resultar conectados aquellos que tengan una conexión activa y mantengan la intención de continuar conectados, así como también aquellos que, encontrándose en estado de

reposo, tratan de iniciar una conexión. Identificados los pares usuario-servicio a tener en cuenta en el problema (pares “optimizables”), se envía dicha información al *Snapshot Optimizer*. Cuando el *Snapshot Optimizer* procese completamente la fotografía actual y comunique al *Monitoring System* los resultados de la optimización, se ejecutará la rutina que calcula el estado definitivo de cada par usuario-servicio; actualizándose, a su vez, las estadísticas que gestiona el sistema de monitorización.

- **Sistema de estadísticas.** La generación de estadísticas es uno de los pilares en los que se apoya el modelo propuesto. Deben por tanto proporcionar datos que permitan interpretar correctamente cuáles han sido las consecuencias para la red el aplicar las políticas utilizadas en un escenario en concreto. Se ha optado por un modelo en el que el procesado de estadísticas se va realizando conforme se optimiza cada fotografía, almacenando tan sólo los resultados finales de cada iteración. Esto permite aligerar en gran medida el tiempo invertido en este proceso reduciendo por tanto el tiempo de ejecución final. Existen tres tipos de estadísticas; las correspondientes a los servicios en curso, las relacionadas con los AE y las pertenecientes a los servicios finalizados. Para la primera de ellas se va almacenando, de forma temporal, información acerca de las llamadas en curso, a la espera de que se produzca un nuevo evento correspondiente con dichos servicios: finalización satisfactoria (*successful*), interrupción repentina (*dropped*), o no haber llegado a iniciarse (*rejected*). Una vez producido cualquiera de estos eventos, la información estadística se almacenará en función del tipo de evento, reiniciando los valores de la estructura correspondiente para su uso en nuevas llamadas. Por otra parte, las estadísticas relacionadas con los eventos producidos en los AE adquieren una gran relevancia, ya que una parte importante de los resultados proporcionados por el sistema de gestión de precios, esta representada por las ganancias obtenidas por los AE, de acuerdo a la tarifa ofrecida al usuario al momento de conectarse. Finalmente, tal como se describió anteriormente, se emplea un almacén temporal en el que se van recogiendo datos acerca de los servicios en curso. Cuando uno de ellos finaliza, se procesa y registran las estadísticas del mismo en una estructura indexada, de manera que los datos que se van guardando se clasifican en función del tipo de usuario y servicio, para facilitar la generación de resultados.

4.2.2. Modelado del servicio

Tal como se ha comentado anteriormente, el modelo oGASE hace uso de la **intención** de los pares usuario-servicio, lo que provoca que éstos puedan encontrarse en situaciones diferentes, en función de si quieren o no conectarse con la red y, en caso de que así fuera, dependiendo de si se acepta o rechaza la llamada (cuando es nueva), o bien la interrumpe (si ya estuviera en curso). El conjunto de posibles situaciones en las que se encuentra un determinado par usuario-servicio, se ha modelado como una máquina de estados finita en la que se pueden distinguir cuatro situaciones diferentes, que se explican a continuación.

- **Reposo (*Idle*).** El usuario *i* no tiene el servicio *k* activo y, por lo tanto, no requiere una conexión para dicho servicio, ya que no produce tráfico de datos en ese momento. El par no intenta conectarse mientras se encuentre en este estado.
- **Activo (*Active*).** El usuario *i* mantiene activo el servicio *k*, ya que una llamada ha sido aceptada por alguno de los AE disponibles, con el que ha establecido una conexión para cursarla. Estar en esta situación no asegura, en ningún caso, que la llamada finalice

con éxito. El mantenimiento de la misma dependerá del resultado del problema en cada fotografía, pudiendo darse el caso de que sea interrumpida, dando lugar a una finalización inesperada para el usuario.

- **Rechazado (*Rejected*)**. El usuario *i* inició un flujo asociado al servicio *k*, pero éste no fue aceptado por la red. El par, que se encontraba en estado *idle*, cambia su intención, tratando de conectarse a la red, pero su llamada no es aceptada por ningún AE.
- **Interrumpido (*Dropped*)**. El usuario *i* mantenía el servicio *k* activo, ya que una llamada fue inicialmente aceptada. Sin embargo, ésta se interrumpe antes de finalizar adecuadamente, debido, por ejemplo, a la movilidad del usuario.

Con los estados mencionados, y teniendo en cuenta que la optimización para un escenario dado consiste en la resolución de sucesivas fotografías, se representa la evolución de un par usuario-servicio concreto de acuerdo a la Figura 4.8. Las flechas indican la transición entre estados, que dependen de dos aspectos: la intención del usuario para ese servicio y el resultado de la optimización de la fotografía vigente; estos valores se representan con la pareja de números sobre las flechas (**intención/resultado**). La máquina de estados será la que, en definitiva, proporcione al *Monitoring System* la información que se describe seguidamente.

- **Pares optimizables**. Para tener un conocimiento completo de los estados de cada servicio, se propone usar los resultados de la instancia previa del problema para identificar los pares usuario-servicio que vayan a formar parte del problema en la fotografía actual, según la máquina de estados mostrada en la Figura 4.8. Se puede ver que, dependiendo del estado previo y de la intención actual, existen situaciones para las que la variable correspondiente no entrará a formar parte del problema, representándose mediante líneas discontinuas. Esta situación se produce antes de que se lleve a cabo la resolución del problema, por lo que no se conoce el componente **resultado** de la pareja de números sobre las flechas; sin embargo, como estas variables no formarán parte del problema, se les asigna el valor 0.0. Independientemente del estado en el que se encuentre, cuando un usuario *i* no tiene intención de tener el servicio *k* activo, la variable básica correspondiente no se incluye en el problema de optimización ($x_{ijk} = 0 \quad \forall j$) y, por tanto, pasa al estado *idle*. Por otro lado, en el momento en que un servicio sea rechazado o interrumpido, la variable asociada al par usuario-servicio se descarta para el problema vigente, sin tener en cuenta la intención del usuario. Se asume que las conexiones que se han perdido no se pueden recuperar, por lo que permanecen en el mismo estado (*rejected* o *dropped*) hasta que vuelven al estado *idle*. A fin de reflejar de la mejor manera posible los escenarios analizados con mCASE, cuando un servicio es rechazado o interrumpido, la variable correspondiente no será considerada en las siguientes instancias del problema, hasta que el servicio se inicie nuevamente (ver el modelado del tráfico los servicios, Sección 5.2.1).

En definitiva, a través de la máquina de estados se puede determinar el conjunto de tuplas usuario-servicio que se encuentran en un estado válido para ser optimizados (pares “optimizables”) o, por el contrario, aquellos que están en una situación en la que no deben ser considerados en el correspondiente problema.

- **Estados finales**. Únicamente aquellos pares usuario-servicio que tengan intención de conectarse, y cuyo estado previo sea reposo o activo, formarán parte del problema de

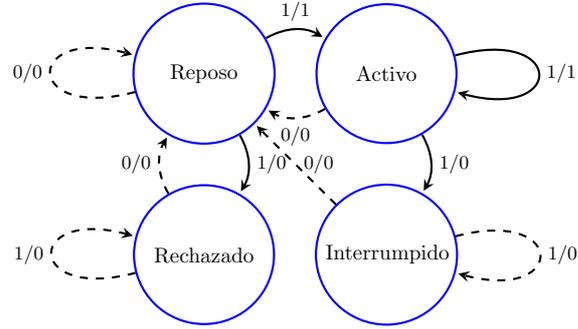


Figura 4.8: Máquina de estados para un par usuario-servicio

optimización, representándose en la máquina de estados con líneas continuas. Dependiendo del resultado de la optimización, el estado final de cada uno de ellos (los que han formado parte del problema) será rechazado o activo, si el estado previo era reposo; o interrumpido/activo, si provenía del estado activo.

4.2.3. Formulación del problema de optimización

Durante el proceso de optimización realizado por el *Snapshot Optimizer*, se proporciona la información necesaria al *solver* para que éste pueda encontrar las soluciones al problema de optimización planteado. Para definir dicho problema se utiliza un escenario genérico que consta de \mathbf{N} elementos de acceso diferentes, por lo tanto, dotadas de diferentes características en términos de cobertura y capacidad. También se asume que existen \mathbf{U} usuarios finales, capaces de iniciar \mathbf{S} servicios diferentes de forma simultánea; además se considera que los usuarios poseen terminales capaces de establecer conexiones con todas las tecnologías presentes en el escenario. Para el modelo oGASE, el problema de selección de acceso trata de establecer la asociación óptima global entre los flujos activos (servicios) de los usuarios con las alternativas de acceso disponibles. Así, se formula como un problema de optimización entera binaria, en el que aparecen $\mathbf{U} \times \mathbf{N} \times \mathbf{S}$ variables básicas (x_{ijk}), que se definen como sigue:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si el usuario } i \text{ usa el AE } j \text{ para el servicio } k \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.7)$$

Básicamente cada x_{ijk} representa un posible estado de conectividad, cuyo valor final dependerá de los objetivos de optimización y las características del escenario bajo análisis. Se define así el problema de optimización mostrado a continuación:

$$\mathbf{max} \quad \sum_{i,j,k} u_{ijk} \cdot x_{ijk} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{s.t.} \quad \forall i, j, k \quad x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (4.9a)$$

$$\forall i, k \quad \sum_j x_{ijk} \leq 1 \quad (4.9b)$$

$$\forall j \quad \sum_{i,k} x_{ijk} c_k \leq C_j \quad (4.9c)$$

Cada variable x_{ijk} es modulada por una función de utilidad agregada (u_{ijk}), que permite cuantificar el beneficio que puede recibir una conexión en particular, en base a diversos criterios, de forma similar a como se realiza en mCASE (ver Ecuación (4.1)), solo que en este caso se añade una dimensión más a la utilidad global (servicio k):

$$u_{ijk} = \sum_{m=1}^M \omega_m \cdot (f_{ijk})_m \quad (4.10)$$

donde ω_m es el peso del m -ésimo criterio y $(f_{ijk})_m$ es el valor de la función de utilidad de cada uno de los M criterios considerados dentro de la estrategia de selección de acceso, los cuales, al igual que para el caso de mCASE, se diseñan para que estén acotados dentro del intervalo $[0,1]$. Es importante indicar que esta utilidad agregada, a pesar de que pueda depender de condiciones particulares (por ejemplo conectividad física), se mantiene constante para cada instancia del problema, garantizando de esta manera la linealidad del modelo (esto es, u_{ijk} no depende de x_{ijk}).

Asimismo, se definen tres restricciones al problema. Estas son las que, junto con los límites superiores e inferiores propios de un problema de optimización, permiten controlar los resultados a obtener más allá de la propia maximización de la función objetivo. Son por tanto estas restricciones las que modelarán el hecho de que una red de telecomunicaciones posee recursos limitados tanto por parte de los operadores, en sus estaciones base, como por parte de los usuarios, en sus terminales.

- (4.9a) asegura que las variables básicas son binarias.
- (4.9b) fuerza a que cada servicio esté asociado a un único AE.
- (4.9c) limita el número de conexiones que se pueden realizar sobre un AE determinado (con capacidad C_j) de acuerdo a las capacidades requeridas por cada uno de los servicios (c_k).

Merece la pena aclarar que no todas las variables indicadas formarán parte del problema ya que, por ejemplo, aquellas combinaciones que carezcan de conectividad física entre el usuario i y el elemento de acceso j se descartarán ($x_{ijk} = 0 \quad \forall k$). De igual manera, cuando un determinado servicio k se encuentra inactivo para un usuario i también se descartará, añadiendo las restricciones correspondientes: $x_{ijk} = 0 \quad \forall j$.

4.2.4. Modelado de las funciones de utilidad para oGASE

Tal como se mencionó en la sección anterior el modelado realizado en oGASE implica que durante el análisis se tengan en cuenta tres variables, que representan el usuario, el elemento de acceso, y el servicio; debido a ello, las funciones de utilidad descritas en esta sección hacen uso de esas tres variables. Por otra parte, aunque muchos de los criterios de mCASE son conceptualmente similares a los utilizados en los procesos de optimización, la filosofía bajo la cual ha sido diseñada la herramienta oGASE hace necesario que el planteamiento matemático sea diferente. A continuación se describen las funciones de utilidad correspondientes a los criterios involucrados en oGASE, que pueden formar parte de la función global u_{ijk} mostrada en la Ecuación (4.10).

Criterio de Conectividad

Considerando que, desde el punto de vista de la QoS, es preferible mantener un servicio en curso en lugar de admitir uno nuevo, este criterio refleja la importancia de que un servicio se encuentre previamente conectado, otorgando indirectamente una mayor prioridad a aquellos que actualmente se están cursando. Para ello se les otorga una mayor utilidad, en comparación con un nuevo servicio (aquel que se inicia en la actual fotografía), intentando reducir la posibilidad de ser interrumpidos. Este criterio α_{ijk} se define como:

$$\forall j \quad \alpha_{ijk} = \begin{cases} 1 \cdot \frac{c_k}{\max_{\forall k} c_k} & \text{si el par } \langle \text{usuario } i, \text{ servicio } k \rangle \\ & \text{estaba anteriormente conectado} \\ \lambda \cdot \frac{c_k}{\max_{\forall k} c_k} & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.11)$$

en donde c_k representa la capacidad requerida por el servicio k , y el parámetro λ permite asegurar que se conceda mayor prioridad a un servicio en curso que a nuevas llamadas, sin importar la capacidad requerida por estas. Por lo tanto, el parámetro de diseño λ , cuyo valor se define en función del escenario de selección de acceso que se este analizando (ver Sección 6.4), debe cumplir la siguiente restricción:

$$\lambda < \frac{\min_{\forall k} c_k}{\max_{\forall k} c_k} \quad (4.12)$$

Como se puede observar, esta función considera la capacidad requerida por cada servicio; de otro modo, a aquellos que necesitaran mayor capacidad se les daría (de manera indirecta) una prioridad más alta. Por ejemplo, una conexión de un servicio que requiriera 2 TU tendría la misma utilidad que otra de 1 TU, mientras que consumiría el doble de recursos. Por ello, si no se utiliza dicho factor en α_{ijk} , la optimización siempre se decantaría por dos conexiones de 1 TU en detrimento de una de 2 TU.

Criterio de Traspaso

Siguiendo el mismo fundamento que el descrito para su afín en la Sección 4.1.4, este criterio también considera la influencia que tendría realizar un traspaso sobre la utilidad global. En este sentido se modela la preferencia del usuario por mantener el acceso actual, a fin de evitar el coste que se produce al realizar un cambio de elemento de acceso. Este criterio β_{ijk} se define como:

$$\beta_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si el par } \langle \text{usuario } i, \text{ servicio } k \rangle \\ & \text{estaba anteriormente conectado al AE } j \\ 1 - \mu & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.13)$$

en donde $\mu \leq 1$ es un parámetro de diseño cuyo valor se define en función del escenario de selección de acceso en concreto (ver Sección 6.4).

Criterio de Precio

Este criterio sigue la filosofía descrita para su análogo en la Sección 4.1.4, modelando la predisposición de los usuarios a seleccionar el elemento de acceso que ofrezca el precio más bajo. A fin de permitir la comparación relativa entre los precios ofrecidos se propone el uso de una función logarítmica, similar a la mostrada en la Figura 4.5, definida en este caso como sigue:

$$\forall k \quad \gamma_{ijk} = \begin{cases} 1 & p_j < p_j^{\min} \\ -\log(p_j) & p_j \in [p_j^{\min}, p_j^{\max}] \end{cases} \quad (4.14)$$

donde p_j es la tarifa ofrecida por el AE j , definiendo como límites p_j^{\min} y p_j^{\max} , precios que el AE esta dispuesto a tarificar como mínimo y máximo, respectivamente, por el uso de sus recursos. Se asume que aquellos AE que ofrezcan un precio por encima del máximo admisible por el usuario, serían descartadas.

Criterio de *RAT affinity*

El propósito de este criterio es el de favorecer que los servicios se asocien a las tecnologías de acceso más apropiadas a sus características. Por ejemplo, se podría considerar la tecnología WLAN como la más apropiada para aplicaciones de datos, sin un requisito estricto de retardo, al ofrecer un mayor ancho de banda. La función de utilidad para este criterio (δ_{ijk}) se define como:

$$\forall i \quad \delta_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si el servicio } k \\ & \text{tiene afinidad por la tecnología del AE } j \\ \nu & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.15)$$

en donde $\nu < 1$ es un parámetro de diseño que modula la utilidad que se le da a este aspecto en particular, y cuyo valor depende del escenario de selección de acceso en el cual se utilice.

Criterio de Tipo de usuario

Pretende modelar el hecho de que determinados usuarios, dispuestos a pagar un mayor precio por los recursos solicitados, reciban un trato preferencial a la hora de conectarse a los elementos de acceso. Este criterio le permitiría al operador proporcionar una mayor prioridad a dichos usuarios, a los que se les denomina *business*, cuando soliciten acceder a sus recursos. En el lado opuesto de encuentran los usuarios *consumer*, que no están dispuestos a pagar un mayor coste por recibir dicha preferencia. La función de utilidad para este criterio (ϵ_{ijk}) se define como:

$$\epsilon_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si el usuario } i \text{ es } business \\ 1 - \xi & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4.16)$$

Al igual que en los criterios anteriores, el valor del parámetro de diseño $\xi < 1$ se determinará en función del escenario de selección de acceso en el que se utilice.

5

Capítulo

Herramientas de Simulación

En base a los modelos descritos en el Capítulo 4, diseñados para llevar a cabo la metodología de análisis que se utilizará en la Tesis, en este apartado se detallan los aspectos relacionados con sus respectivas implementaciones en herramientas de simulación. Se pretende desarrollar entornos flexibles, escalables y de fácil configuración, con el objetivo de poder acometer la evaluación de diversos escenarios de selección de acceso. A diferencia de otras plataformas similares, las herramientas de simulación que se presentan permiten desplegar escenarios altamente configurables, con diferentes tipos de usuarios, de servicios, de terminales y de tecnologías, así como con un elevado número de usuarios y elementos de acceso, gracias a las técnicas de abstracción incorporadas en su diseño, que les permite simular escenarios complejos sin incrementar, de manera notable, la carga computacional. A su vez, facilita la evaluación de algoritmos que involucran varios operadores, llegando, por tanto, a desarrollarse escenarios de red multi-acceso, multi-interfaz, multi-servicio y multi-operador.

5.1. Estado del arte

En la actualidad existe una gran variedad de herramientas de simulación que, a grandes rasgos, podrían ser clasificadas en función de las capas del modelo OSI en las que operan [Kasch et al., 2009]. Por una parte están aquellas diseñadas para caracterizar el rendimiento y las interacciones de la capa física y de enlace, considerando para ello parámetros relacionados con las formas de onda, radio-frecuencia, propagación, etc.; por otra parte, se cuenta con alternativas que involucran el resto de capas, principalmente centradas en la evaluación del rendimiento de protocolos de red, por lo que se suelen catalogar como herramientas de simulación de red. Las que se describen en este capítulo pertenecen a esta última categoría, por lo que en adelante sólo se hará alusión a ésta.

A su vez, se pueden encontrar sistemas implementadas bajo distinta filosofía, como aquellas diseñadas para ser un producto comercial y otras que se distribuyen como código abierto. Ambas categorías presentan ventajas y desventajas que el investigador tendrá que sopesar a la hora de decantarse por una en concreto. Muchas herramientas de simulación tienen su origen en un proyecto de investigación y, por tanto, habitualmente mantienen su filosofía de código abierto, como GloMoSim [Zeng et al., 1998] y OMNet++ [Varga, 2001]; sin embargo, en algunos casos, evolucionan a versiones comerciales, como QualNet [Scalable Network Technologies, Inc., 2014] y OMNEST [Varga y Hornig, 2008], respectivamente. Otras herramientas de simulación a destacar son *ns2* (y su reciente sucesor

ns3 [Henderson et al., 2006]), en la vertiente de código abierto, y la plataforma OPNET [Chang, 1999], como representante más destacado del grupo de herramientas comerciales.

El objetivo principal de todas ellas es facilitar el desarrollo de la simulación que se pretende llevar a cabo, ofreciendo módulos integrados con los que es posible interactuar rápida y dinámicamente; sin embargo, suelen presentar la desventaja de que se desconoce su funcionalidad interna, o resulta complicado modificar su estructura para adaptarla a un análisis en particular. Llegados a este punto tiene sentido plantearse si es más conveniente hacer uso de una plataforma ya implementada o apostar por el desarrollo de una herramienta de simulación personalizada. Con esta última opción, el diseñador tendría la ventaja de conocer las características, capacidades, y limitaciones específicas de la herramienta que ha diseñado. Así, podría enfocar el diseño de la misma hacia sus objetivos concretos, y refinar los modelos y resultados de acuerdo a sus necesidades.

Por otro lado, está claro que el diseño de una nueva herramienta de simulación puede requerir un gran esfuerzo, por lo que cobra mucha importancia las abstracciones que se adopten durante su desarrollo, ya que pueden evitar la necesidad de llegar al mínimo detalle en cada aspecto. Incluso en las herramientas de simulación más conocidas se realiza algún tipo de simplificación, debido principalmente a las limitaciones de los recursos computacionales, por ejemplo memoria y capacidad de procesado, de los equipos sobre los que se ejecutarán las simulaciones. Aunque existen técnicas de procesado paralelo y estrategias distribuidas [Lee et al., 2009] para realizar simulaciones a gran escala, el nivel de exigencia, tanto de hardware como de software, hace que sea una alternativa poco viable. Como contrapartida, adoptar algún tipo de simplificación conlleva reducir la precisión de la simulación. Por esta razón, es necesario llegar a un compromiso entre el grado de abstracción a realizar y la pérdida de precisión en la que se incurre. Existen trabajos que han evaluado este tipo de compromiso, como en [Heidemann et al., 2001], en el que a través de casos de uso se estudia el efecto del nivel de detalle de los modelos de propagación radio en las simulaciones de redes inalámbricas. Los autores ponen de manifiesto que un modelo de propagación más simple puede ser más efectivo en casos donde el objetivo principal de la simulación no dependa fuertemente de las abstracciones de la capa física, aunque a pesar de ello siga siendo una parte importante de la misma.

El adoptar una mayor precisión a la hora de modelar el sistema que se desea simular, conlleva, en muchos casos, un incremento sustancial en el tiempo de ejecución. Esta situación se acentúa cuando se pretende trabajar con sistemas que involucren un considerable número de elementos relacionados con los procesos de selección de acceso (usuarios, terminales, estaciones base, criterios de selección, etc.). Por este motivo, existen en la literatura numerosos trabajos han limitado el número de elementos involucrados en sus procesos de simulación, por ejemplo, en [Xing y Venkatasubramanian, 2005] el análisis sólo involucra un punto de acceso Bluetooth, dos Wi-Fi, y dos estaciones base, mientras que dentro de los criterios utilizados, sólo considera aquellos relacionados con el consumo de energía. De forma similar, en [de Sousa et al., 2006] se incluyen sólo un *hotspot* Wi-Fi y dos estaciones base, considerando un número reducido de criterios, relacionadas principalmente con la carga. Finalmente, en [Giupponi et al., 2005] se utilizan cuatro nodos UMTS, dos GSM, y una WLAN, considerándose en este caso un abanico más variado de criterios, aunque de nuevo limitado en su número.

Teniendo en cuenta estas premisas se propone el diseño de herramientas de simulación que permitan recoger las características más relevantes de las redes inalámbricas heterogéneas sobre las que se pretende evaluar los algoritmos de selección de acceso. Para superar los inconvenientes que subyacen en la implementación de una nueva herramienta, se considera-

rán determinados modelos de abstracción para reducir la carga computacional, permitiendo incluir un mayor número mayor de entidades de red, de diferentes tipos, que reflejen adecuadamente los entornos heterogéneos; a su vez, proporciona la posibilidad de enfocar los esfuerzos de diseño de los procesos de simulación en tareas específicamente relacionadas con los procedimientos de selección de acceso.

5.2. mCASE

Esta herramienta de simulación sigue las directrices del modelado descrito en la Sección 4.1. Es un simulador gestionado por eventos, que hace uso de la técnica de programación orientada a objetos, y que está implementado en C++. Permite la creación de diferentes escenarios de red en base a la especificación, en número y tipo, de los diversos elementos que forman parte de la simulación (tecnologías de acceso, terminales, estaciones base, usuarios, servicios, etc.). Presenta la capacidad de replicar escenarios previamente analizados, almacenando no solamente las características y el número de elementos de la simulación, sino también los eventos correspondientes, con su respectiva información asociada, generados por el movimiento de los usuarios y por los servicios que han sido inicializados durante la simulación. Esto permite evaluar el impacto de las diferentes estrategias bajo análisis sobre un mismo escenario.

5.2.1. Principios de diseño

Determinados aspectos, relacionados con los procesos de selección de acceso, tienen que ser modelados teniendo en cuenta el objetivo de los estudios que se llevarán a cabo. Entre ellos destacan el patrón de tráfico del que harán uso los servicios a la hora de solicitar recursos a la red, así como los movimientos que realizarán los usuarios dentro de los límites del área de simulación. Por otra parte, tal como se comentó anteriormente, también es necesario adoptar ciertas simplificaciones que permitan asegurar el desarrollo de una herramienta de simulación flexible y escalable. Entre ellas, una de las más importantes es la abstracción del canal radio, que proporciona el nivel de calidad del enlace inalámbrico establecido entre el usuario y el elemento de acceso; también es relevante definir una medida de la capacidad que sea independiente de la tecnología subyacente, así como adoptar una unidad monetaria genérica a ser utilizada en las interacciones económicas llevadas a cabo durante el análisis.

Modelado del tráfico de los servicios

Para evaluar el impacto que producen los servicios en el rendimiento de la red, es necesario modelar el tráfico que genera cada tipo de servicio. En muchos trabajos, como en [Klemm et al., 2001] y [Hassan et al., 2005], se ha estudiado el modelado de tráfico a diferentes escalas de detalle, llegándose a diseñar una estructura jerárquica, basada en tres niveles anidados, tal como se muestra en la Figura 5.1. Según ella, las sesiones se componen de un conjunto de conexiones que, a su vez, generan una serie de paquetes. Cada nivel se corresponde con una escala temporal diferente, desde milisegundos en el nivel inferior (paquetes), hasta horas en el nivel de sesión. A continuación se describen las principales características de cada uno de esos niveles.

- **Nivel de sesión.** Modela el uso que hace un usuario de una determinada aplicación, desde su inicio hasta su desconexión del sistema. En muchos casos es difícil predecirlo,

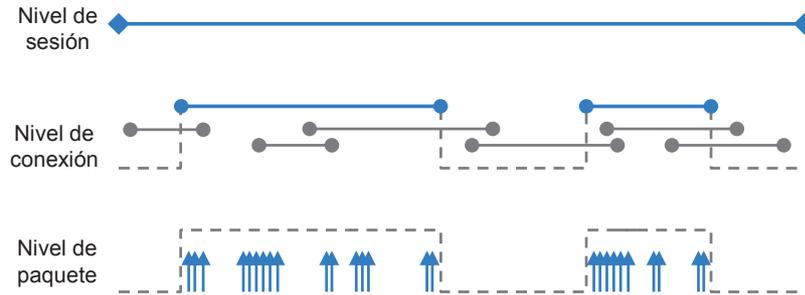


Figura 5.1: Estructura jerárquica del modelado de tráfico

debido a que depende principalmente del comportamiento del usuario, sus hábitos, horarios de trabajo, e incluso políticas de tarificación que pueda ofrecer el proveedor del servicio. En la teoría tradicional del teletráfico se usa el tiempo entre llegadas como uno de los parámetros para definir el modelo, bajo la suposición que el conjunto de usuarios es infinito. Sin embargo, a nivel de sesión, y en especial considerando el tráfico Internet, esta suposición puede no ser correcta, sobre todo en los sistemas inalámbricos, donde cada elemento de acceso de tipo WLAN no es capaz de soportar muchos usuarios simultáneamente. Una solución es obviar el nivel de sesión o, de manera equivalente, suponer que las sesiones tienen duración infinita, por lo que en la Figura 5.1 se representa la sesión como una línea continua.

- Nivel de conexión.** Cada aplicación establece, a su vez, una serie de conexiones con los elementos de acceso, para cursar los servicios que soporta dicha aplicación. Tomando como ejemplo el navegador *web*, ésta permite visualizar páginas que pueden incluir, a su vez, enlaces a otras páginas, así como a objetos incrustados como video, imágenes, etc. Así, se establecen conexiones independientes con los AE para que cada elemento pueda ser recibido por el navegador. En este sentido, una aplicación puede hacer uso de varios servicios, que quedan a su vez representados por una serie de conexiones. Tal como se muestra en la Figura 5.1, el nivel de conexión representa el servicio como una sucesión detallada de periodos de actividad (conocidos como *ON*) y reposo (denominados *OFF*). Los periodos de actividad pueden representar cualquier clase de conexión e incluir dentro de ellos paquetes con diversos tamaños y tiempos entre llegadas.
- Nivel de paquete.** Permite modelar la información que se transmite/recibe dentro de cada conexión. Al contrario de lo que sucedía con la sesión, en este nivel hay que tener en cuenta factores que son mayoritariamente ajenos al usuario, como el estado de la red (que determinará los retardos), y el diseño de los protocolos utilizados (que influirá en la forma de empaquetar la información).

Teniendo en cuenta el alcance que tiene cada nivel de modelado del tráfico, y considerando que dentro de los objetivos de la Tesis no se encuentra el estudio detallado de su comportamiento, se ha optado por modelar los servicios a nivel de conexión. En este sentido, éstos quedarán representados por una serie de conexiones, con periodos de actividad y reposo, cuyas duraciones dependen del servicio que se pretende representar, pudiendo estar basadas en una distribución lognormal (como se propone en [Klemm et al., 2001]) o una variable aleatoria exponencial negativa, comúnmente utilizada en la mayoría de los trabajos en los que se usan modelos de tráfico.

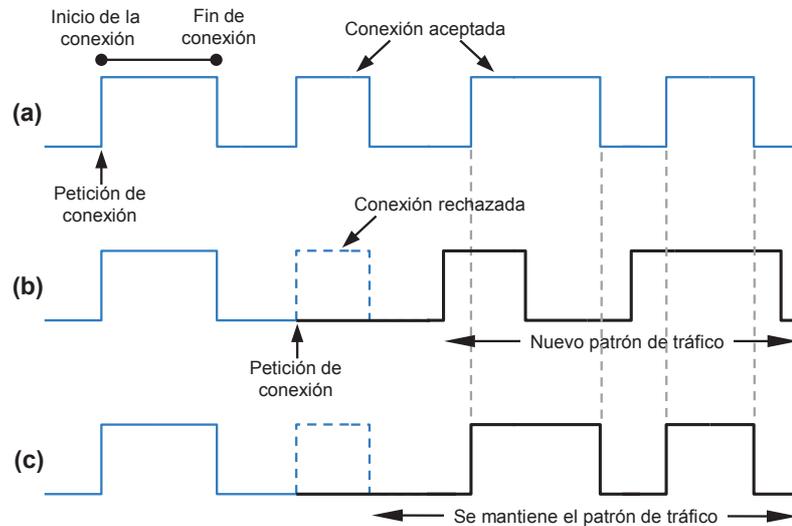


Figura 5.2: Modelado del tráfico de los servicios

En base al modelo adoptado para los servicios, la herramienta mCASE ofrece la posibilidad de evaluar diferentes estrategias de selección de acceso, haciendo uso de los mismos patrones de tráfico, con el fin de poder comparar los resultados obtenidos bajo un mismo escenario. Para ello, es necesario almacenar los eventos que describen el comportamiento de los servicios, de tal forma que mCASE pueda tener un conocimiento a priori de los servicios a ser utilizados.

Tal como se muestra en la Figura 5.2, los eventos relacionados con los servicios definen los instantes de tiempo en los que tiene lugar algún suceso, tales como la petición de una nueva conexión, el inicio de la misma (si es aceptada), o su fin, entre otras. Si se asumiera que un servicio siempre tiene a su disposición recursos entre los AE a su alcance, el patrón de tráfico tendría el comportamiento mostrado en la Figura 5.2(a), es decir, todas las peticiones de conexión serían aceptadas. Pero en una situación real eso pudiera no ocurrir, y alguna petición podría ser rechazada, teniéndose que adoptar una decisión de diseño a la hora de modelar este suceso. Una alternativa podría ser la mostrada en la Figura 5.2(b), en la que se realiza un nuevo intento de conexión después de que la petición es rechazada. Esto podría verse como una alternativa más realista, por ejemplo para el caso del servicio telefónico, en las que un usuario intenta volver a llamar tan pronto como sea posible. La desventaja de este modelo es que el patrón de tráfico generado dependería de las conexiones rechazadas, y, por tanto, no permitiría tener un conocimiento a priori de los eventos correspondientes a los servicios, impidiendo realizar comparativas de estrategias en igualdad de condiciones. Teniendo en cuenta estas particularidades, se propone el modelo mostrado en la Figura 5.2(c), en el que no se tiene en cuenta la conexión rechazada y, por ende, no altera el patrón de tráfico posterior.

Modelado del movimiento de los usuarios

En diversos estudios realizados sobre redes inalámbricas es habitual que se emplee como modelo de movilidad el denominado *Random WayPoint* [Bettstetter et al., 2003]. Su principal característica es su simplicidad, debido a que necesita un escaso abanico de parámetros para su definición. Asimismo, al no estar enfocado a ningún escenario de aplicación concreto,

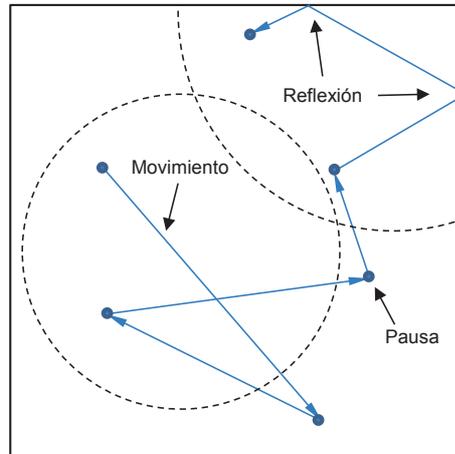


Figura 5.3: Modelo Random WayPoint con procedimiento de reflexión

su alto grado de abstracción lo convierte en un modelo generalista, idóneo para efectuar estudios sobre nuevas propuestas de protocolos o mecanismos de gestión de recursos en redes inalámbricas. Estas ventajas, junto con la facilidad y extensión de su implementación (el modelo se encuentra presente en las librerías de simuladores tan conocidos como *ns3*), han favorecido que sea, con diferencia, el modelo más común en la literatura, razón por la cual también ha sido adoptado dentro del simulador mCASE.

De acuerdo con el modelo *Random WayPoint* los usuarios, partiendo de un determinado punto ubicado dentro del área bajo análisis, se desplazan en línea recta con velocidad constante, durante un determinado tiempo. Así, en el caso de un espacio bidimensional, para cada nuevo movimiento, se determinan las coordenadas (x e y) del siguiente destino mediante dos procedimientos alternativos. El primero de ellos, denominado *plain*, las calcula mediante una variable aleatoria uniformemente distribuida entre 0 (origen de coordenadas) y el límite máximo permitido para los desplazamientos en cada dirección (x_{max} e y_{max} , respectivamente). La segunda alternativa se basa en un procedimiento denominado *reflect*, que hace uso de tres variables aleatorias uniformemente distribuidas para calcular el siguiente destino: una para la velocidad (entre $speed_{min}$ y $speed_{max}$), otra para el tiempo en que el usuario permanece en movimiento (entre $time_{min}$ y $time_{max}$), y una última para el ángulo que define la dirección del movimiento (entre 0 y 2π). A diferencia del primer enfoque, en este caso es posible que, durante el movimiento, se llegue a alcanzar uno de los límites del área bajo análisis, continuando el movimiento tras cambiar de dirección, haciendo uso de un ángulo de reflexión idéntico al de incidencia, tal como muestra en la Figura 5.3. Una vez que se alcanza un destino, y antes que se calcule el siguiente, el modelo *Random WayPoint* permite realizar pausas con una duración entre $pause_{min}$ y $pause_{max}$, igualmente elegida mediante una variable aleatoria uniformemente distribuida.

Abstracción del modelo de propagación radio

Teniendo en cuenta que el objetivo de mCASE no es estudiar de manera detallada las características de los canales inalámbricos, sino que se centra en la evaluación de algoritmos de selección de acceso, se propone abstraer los diferentes modelos de propagación a utilizar en el simulador. Así, se utilizarán alternativas sencillas, pero que en esencia deberían representar, en la medida de lo posible, las características más relevantes de un modelo más elaborado.

Este enfoque ya ha sido utilizado en otros trabajos, como en [Lucas-Estañ et al., 2008], en el que el simulador implementado no pretende modelar con precisión las transmisiones radio, sino determinar la eficiencia de la distribución de recursos propuesta. En la literatura existen estudios que avalan este tipo de abstracción, como [Miozzo y Bader, 2011], en el que se propone una aproximación razonablemente sencilla para modelar un sistema WiMAX, aunque respetando sus aspectos fundamentales. Por su parte, mCASE incorpora una estructura que le permite implementar diferentes opciones, pudiendo hacer uso del sencillo modelo triangular utilizado en [Poyhonen et al., 2007], o uno más elaborado, como el propuesto en [Dobkin, 2002].

Abstracción de la capacidad y coste de los recursos

La cantidad de recursos radio que un AE puede ofrecer depende de un conjunto de parámetros físicos, que permitan transportar la información del usuario correspondiente a un determinado servicio. Algunos de esos parámetros dependen de la técnica de acceso múltiple que se utilice, por ejemplo, en FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) cada recurso radio es equivalente a un determinado ancho de banda; en TDMA (*Time Division Multiple Access*) esta representado por una ranura de tiempo; mientras que en CDMA (*Code Division Multiple Access*) está definida, principalmente, por un código de secuencia [Sallent, 2006]. Además de estos, existen otros elementos físicos que varían a lo largo del tiempo, tales como el esquema de modulación y de codificación de canal, utilizados por las técnicas *Link Adaptation* para seleccionar, de forma dinámica, el modo de operación del enlace radio, con el fin de ajustarlo a las condiciones particulares del canal de transmisión en cada momento.

En entornos tan dinámicos como son los sistemas inalámbricos, es difícil estimar la cantidad de recursos que una tecnología de acceso puede ofrecer en cada momento, sin recurrir a pesadas simulaciones del canal inalámbrico, ya que depende de parámetros físicos que cambian constantemente. Debido a ello, en estudios que no se centran en analizar las particularidades de las transmisiones radio, se suelen realizar abstracciones que permiten obtener valores discretos de la cantidad de recursos que una tecnología puede ofrecer. Son aproximaciones que se basan habitualmente en las características de determinados parámetros físicos de la tecnología inalámbrica; por ejemplo, en [Lucas-Estañ y Gozalvez, 2013] se utiliza la tasa binaria de los modos de transmisión, intentando mantener un equilibrio entre sus valores máximos y las capacidades de corrección de errores. Otros estudios asumen que el sistema utiliza una asignación fija de canales, por lo que cada célula tiene una capacidad fija de recursos, definida por su número de BBU (*Basic Bandwidth Units*) [Nasser y Hassanein, 2004]. Siguiendo esta filosofía, en esta Tesis se define una unidad genérica y discreta, denominada unidad de tráfico (*Traffic Unit*, **TU**), de forma similar a como se utiliza en [Poyhonen et al., 2007], y que se emplea para caracterizar la capacidad, tanto de los elementos de acceso como la de los servicios utilizados por los usuarios.

Por otra parte, también se define una unidad monetaria genérica, *Monetary Unit* (**MU**), que permite especificar la cantidad de dinero que un usuario necesita pagar para cursar sus servicios, en función de los recursos requeridos (número de TU) y la cantidad de tiempo que el usuario hace uso de los mismos.

5.2.2. Eventos gestionados por mCASE

Las simulaciones por ordenador permiten estudiar complicados sistemas que no pueden ser analizados matemáticamente, diseñando y construyendo para ello un modelo de los mis-

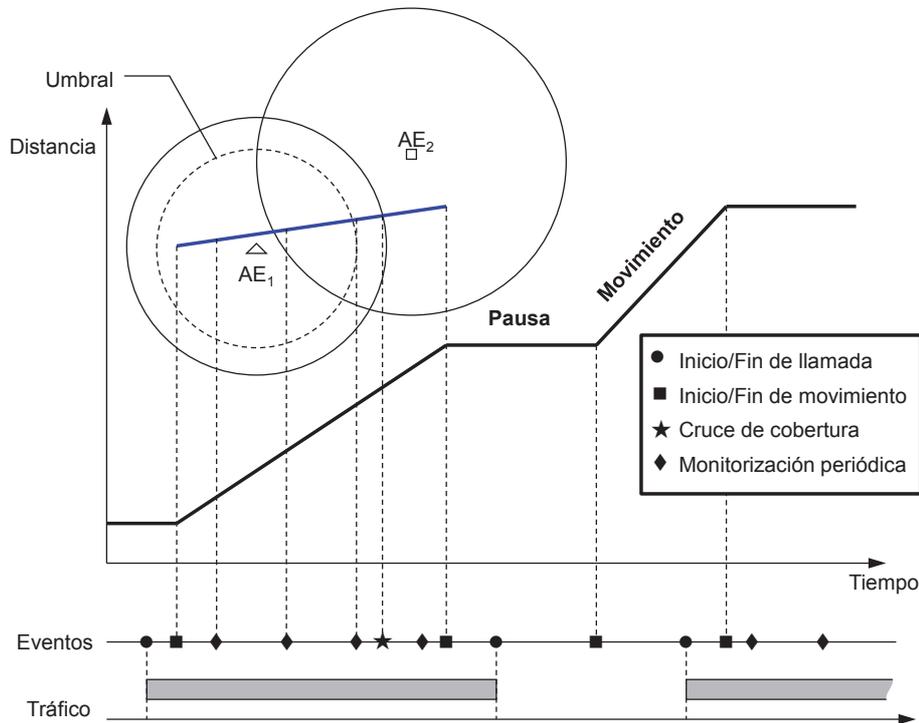


Figura 5.4: *Eventos gestionados por mCASE*

mos, realizando experimentos para determinar cómo trabajaría el sistema real, cómo puede ser mejorado, y cómo posibles modificaciones podrían afectar su comportamiento. Existen diversas metodologías a la hora de diseñar una herramienta de simulación; para el caso de mCASE se hace uso de la simulación por eventos, que modela la operación de un sistema como una secuencia de eventos discretos en el tiempo. Cada uno ocurre en un instante de tiempo concreto, generando un cambio en el estado del sistema [Robinson, 2004]. Se asume que no hay ninguna modificación entre eventos consecutivos, por lo que la simulación puede saltar en el tiempo directamente desde un evento al siguiente.

El simulador mCASE gestiona un número notable de eventos, algunos de los cuales se muestran en la Figura 5.4. Los relacionados con los servicios y movimientos de los usuarios son los que en mayor medida se producen, en comparación con los otros. Al inicio de la simulación se registran los eventos correspondientes a cada inicio y fin de llamada, producidos por el patrón de tráfico de cada uno de los servicios utilizados por los usuarios. Se debe tener en cuenta que cuando una llamada es rechazada durante la ejecución de la simulación, el evento fin de llamada correspondiente a la misma debe ser eliminado, tal y como se describió anteriormente. Con respecto al movimiento de los usuarios, también se genera al inicio de la simulación un patrón para cada uno, registrándose un evento por cada inicio y fin de movimiento. Teniendo en cuenta que al finalizar un movimiento, el usuario se mantiene un determinado tiempo en su misma posición antes de reanudar su desplazamiento (pausa), los eventos correspondientes al fin de movimiento anterior y al inicio del siguiente ocurren en diferentes instantes de tiempo.

Por otra parte, existen eventos menos numerosos pero, en cierta medida, más complejos de determinar, por lo que se explican con más detalle en los siguientes apartados. Cuando un usuario se desplaza dentro del área de cobertura del AE con el que se encuentra conectado,

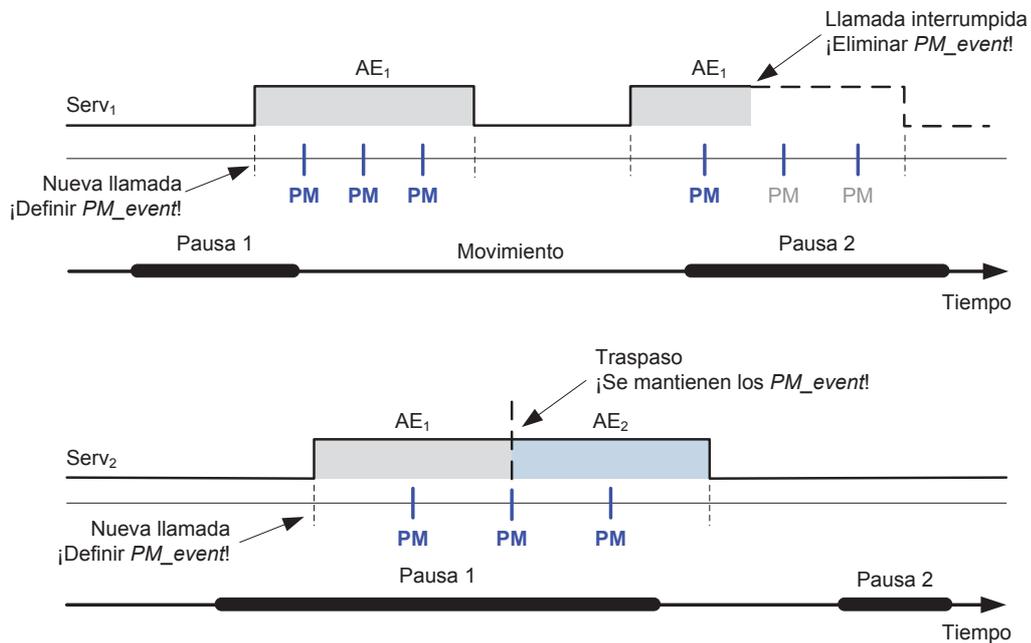


Figura 5.5: Especificación de PM_event dentro de las conexiones de un servicio

podría llegar al límite de su cobertura, estableciéndose en ese instante un evento por cruce de cobertura. Como se conoce de antemano el patrón de movimiento de los usuarios, así como las posiciones y áreas de cobertura de los AE, durante la ejecución de la simulación se calculan todos los instantes en los que un usuario llega a cruzar dichos límites una vez comienza a desplazarse. El último evento que se considera es aquel que se produce periódicamente durante la duración de una llamada, permitiendo la posibilidad de conectarse a otra alternativa de acceso con mayor utilidad.

Eventos de Monitorización periódica de la conexión

Como se ha mencionado anteriormente, cada vez que se lleva a cabo una petición de recursos, el algoritmo de selección de acceso elige, si es posible, la mejor alternativa, en base a las condiciones actuales del entorno que rodea al usuario. Dichas condiciones pueden cambiar durante el tiempo que dura la llamada debido a diversas circunstancias, por ejemplo, el usuario puede desplazarse, llegando a zonas de cobertura en las que no estaba inicialmente o, incluso sin moverse, puede que se modifique la disponibilidad de recursos de otras alternativas de acceso a su alcance. Dentro de esos nuevos contextos pueden aparecer elementos de acceso con una mejor utilidad que la proporcionada por la alternativa a la que el usuario está conectado. En este sentido, para evitar que una conexión quede permanentemente vinculada al AE seleccionado inicialmente, se definen eventos periódicos a lo largo de la duración de la llamada, denominados **PM_event** (*Periodic Monitorig event*). En cada uno de ellos se lanza un proceso de selección de acceso para determinar si existe una alternativa más adecuada.

Para describir la operación de los PM_event , se hará uso de las dos situaciones mostradas en la Figura 5.5. Considerando el servicio $Serv_1$, al inicio de una nueva llamada se determinan los instantes de tiempo en los que se dispararan los PM_event , cuya frecuencia dependerá de un parámetro de configuración que define el porcentaje de la duración de la llamada empleado

como periodo de monitorización. Por otro lado, puede que una llamada se vea interrumpida en su curso, por ejemplo, por pérdida de cobertura del UT. En ese caso, los eventos *PM_event* asignados a dicha llamada que no hayan sido procesados (futuros), serán eliminados. Por otra parte, tal como se muestra en el *Serv₂*, puede que el proceso de selección de acceso desencadenado por un *PM_event* establezca que es necesario realizar un traspaso a otro elemento de acceso, pues ofrece una mejor utilidad. En este caso los *PM_event* definidos al inicio de la llamada se mantienen, ya que no dependen del cambio de AE sino, únicamente, del servicio al cual han sido vinculados.

Eventos debido al cruce del límite de la cobertura

Un usuario que esté dentro del área de cobertura de un elemento de acceso puede llegar a su límite, debido al movimiento que realiza. En ese instante, los servicios que están siendo utilizados por el usuario deberían detectar dicha circunstancia, para que puedan buscar una nueva alternativa de acceso. Para ello se utilizan los eventos *CC_event* (*Cross Coverage event*), los cuales solo consideran los elementos de acceso con los que el usuario está conectado (servicio en curso). Debido a ello, únicamente se tienen en cuenta aquellos cruces del límite cuando el usuario sale, y no cuando entra, del área de cobertura. Ambos supuestos se muestran en la Figura 5.6. Cuando el usuario, estando dentro del área de cobertura del *AE₁* (con el que está conectado), cruza el límite de la cobertura del *AE₂* (*CC₁*), no se considera un evento *CC_event*, mientras que sí se añade este tipo de evento para el cruce *CC₂*. Por otra parte, se entiende que al entrar en otro área de cobertura, sin abandonar la anterior, se podría conseguir una mejor alternativa de acceso, pero esa posibilidad está ya cubierta por los eventos de monitorización periódica.

Mientras un usuario se desplaza dentro de un escenario, se pueden producir varios eventos tipo *CC_event*, debido a la presencia de los diversos AE involucrados en el análisis. Para describir cómo se detectan tales eventos, se utilizará el escenario ilustrativo recogido en la Figura 5.6. Se asume que un usuario puede hacer uso de cuatro servicios; tres de ellos se cursarán siempre por el *AE₁*, mientras que el cuarto servicio hará uso del *AE₂*. Al comienzo el usuario se encuentra dentro del área de cobertura del *AE₁*, dirigiéndose hacia la posición donde se realiza la primera pausa (*P₁*). En ese tramo del movimiento no se llega a cruzar el límite de cobertura del AE con el que se mantienen conexiones, por lo que el evento *ev₁* (inicio de llamada de *Serv₂*) no genera ningún *CC_event*. Por su parte, *ev₂* inicia el periodo de pausa, por lo que todos los eventos de servicios que se produzcan en ese intervalo pasan desapercibidos desde el punto de vista de la generación de *CC_event*. Al comenzar el nuevo movimiento (*ev₆*), se detecta que, en este caso, se van a cruzar los límites de cobertura del *AE₁* (*CC₂*). Al tenerse conocimiento de las características del nuevo movimiento (velocidad, posiciones de inicio y fin), se calcula el tiempo en el que se producirá dicho cruce. Debido a ello, en ese mismo instante de tiempo (*ev₆*) se verifican, para todos los servicios activos (*Serv₁*, *Serv₂*), si sus correspondientes tiempos de fin de llamada son posteriores al tiempo en el que ocurrirá el *CC_event*. Si es así, tal como ocurre con *Serv₁*, se socia un *CC_event* a la llamada correspondiente (*ev₁₀*). Como se puede observar, en el instante *ev₆* el servicio *Serv₃* estaba inactivo, pero posteriormente, mientras el usuario se está moviendo, se inicia una nueva llamada de dicho servicio. En ese momento (*ev₇*), se verifica que el tiempo de finalización de la llamada es posterior al del *CC_event*, condición que sí se cumple, por lo que se registra un nuevo *CC_event* (*ev₁₁*).

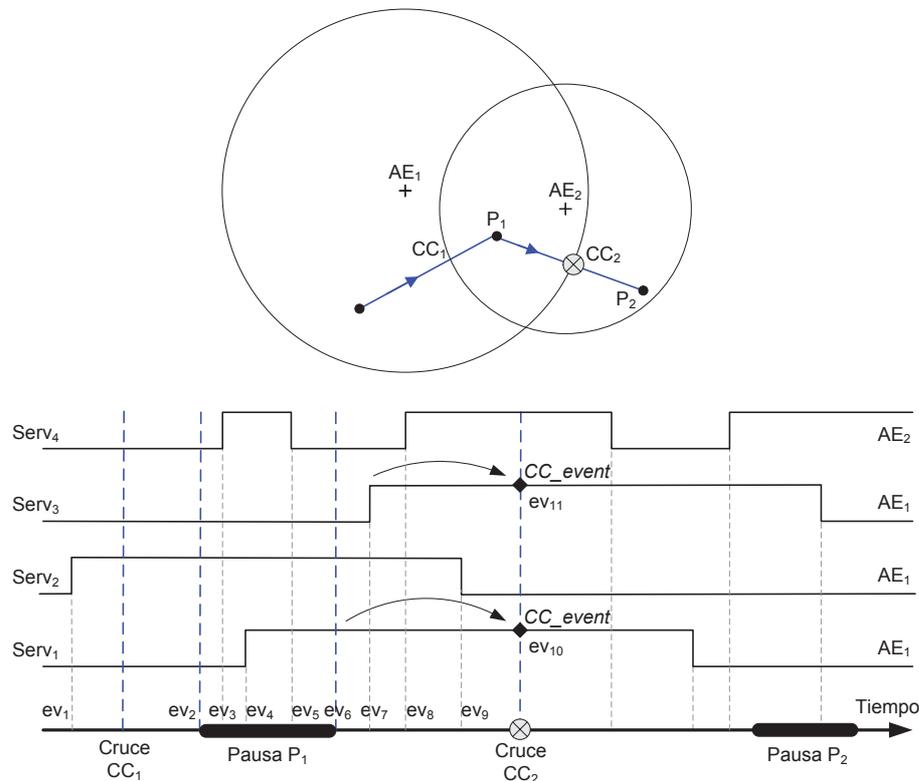


Figura 5.6: Detección de CC_event para las conexiones de un servicio

5.2.3. Implementación del proceso de solicitud de recursos

Algunos de los eventos descritos en la Sección 5.2.2, llaman al proceso de selección de acceso, para determinar la mejor alternativa que se puede ofrecer al usuario teniendo en cuenta el contexto en el que se encuentra en ese momento. Cada vez que se produce un evento de inicio de llamada, monitorización periódica, o cruce de cobertura, se llama a dicho proceso para realizar una petición de recursos a aquellos AE en cuya cobertura se encuentra el usuario, pero considerando a su vez las preferencias del mismo y los requerimientos de la red, recogido en los denominados **criterios de selección de acceso**. Dependiendo del resultado del proceso de selección, cuyos detalles se explican en la siguiente sección, se pueden dar una serie de casos, tal como refleja la Figura 5.7.

Si se logra determinar el AE que mejor cumple con los criterios utilizados, éste pasa a denominarse **Acceso Seleccionado** (*Access Selected*, AS); adoptándose posteriormente diversas decisiones en base a dicha entidad. Si el servicio que inició el proceso de selección estaba previamente conectado a un AE, es necesario establecer si dicho AE es diferente del AS; si es así, implicaría que se está produciendo un traspaso, por lo que se procede a liberar los recursos que el servicio tenía asignados en el anterior AE, para luego conectar y asignar los recursos correspondientes en el AS; también se eliminan los eventos *CC_event* y *PM_event* que se habían calculado cuando el servicio estaba conectado al anterior AE y que, al realizarse el traspaso, pierden validez. Si, por el contrario, el servicio no se encontraba conectado a ningún AE antes de llamar al proceso de selección, situación que se corresponde con una nueva llamada, se procede a conectar y asignar los recursos necesarios en el AS, para

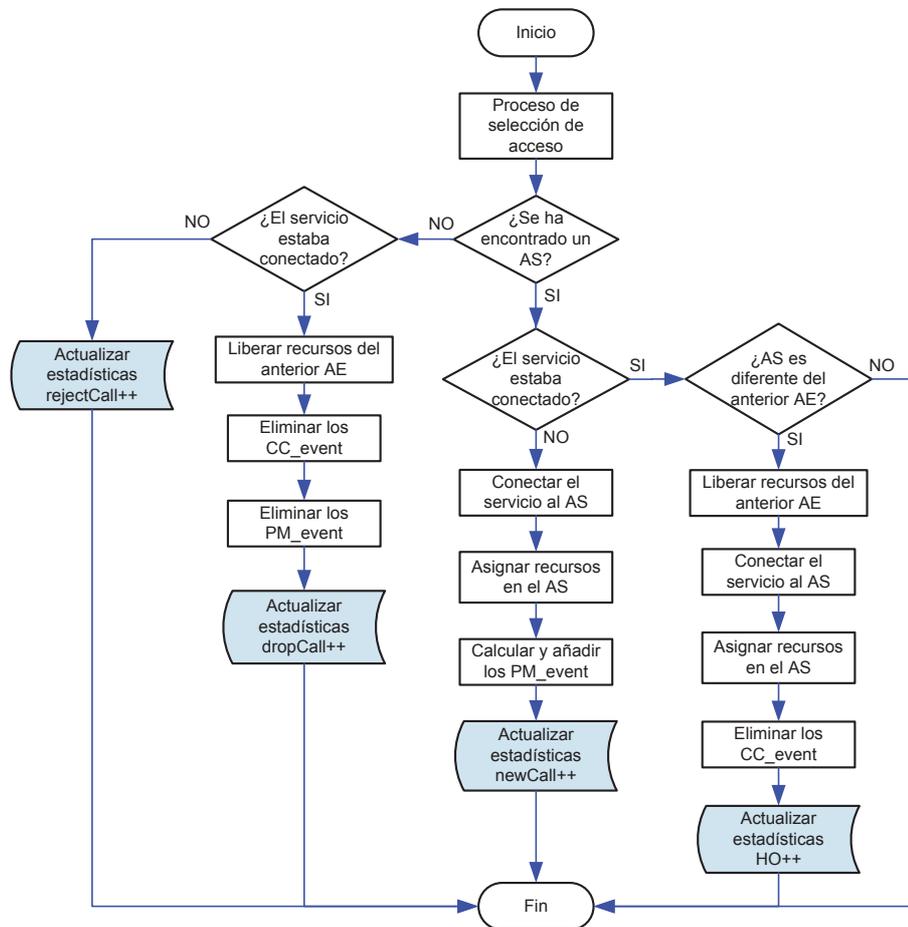


Figura 5.7: Diagrama de flujo del procedimiento de petición de recursos

posteriormente calcular los eventos PM_event correspondientes, añadiéndolos al registro de eventos.

Si el proceso de selección de acceso no logra encontrar un AE que cumpla con los criterios del algoritmo empleado, se determina si el servicio que inició dicho proceso se encontraba conectado a un AE; en caso afirmativo se estaría ante una llamada interrumpida, por lo que se liberarían los recursos asignados en dicho AE, eliminando también los eventos PM_event y CC_event correspondientes al servicio y movimiento actual del usuario, respectivamente. En caso de que el servicio no se encontraba conectado a ningún AE, implicaría que se habría rechazado una llamada. Como se puede observar en la Figura 5.7, al final de todos los casos se actualizan las estadísticas correspondientes, llevando un registro de los diversos estados por lo que transita cada uno de los servicios.

5.2.4. Implementación del proceso de selección de acceso

El proceso de selección de acceso es uno de los elementos fundamentales del simulador mCASE, ya que implementa la lógica que determina la mejor alternativa de acceso que se puede asignar a un usuario considerando el contexto en el que se encuentra. Tal como se observó en la Figura 4.4, el modelo correspondiente está constituido por tres componentes

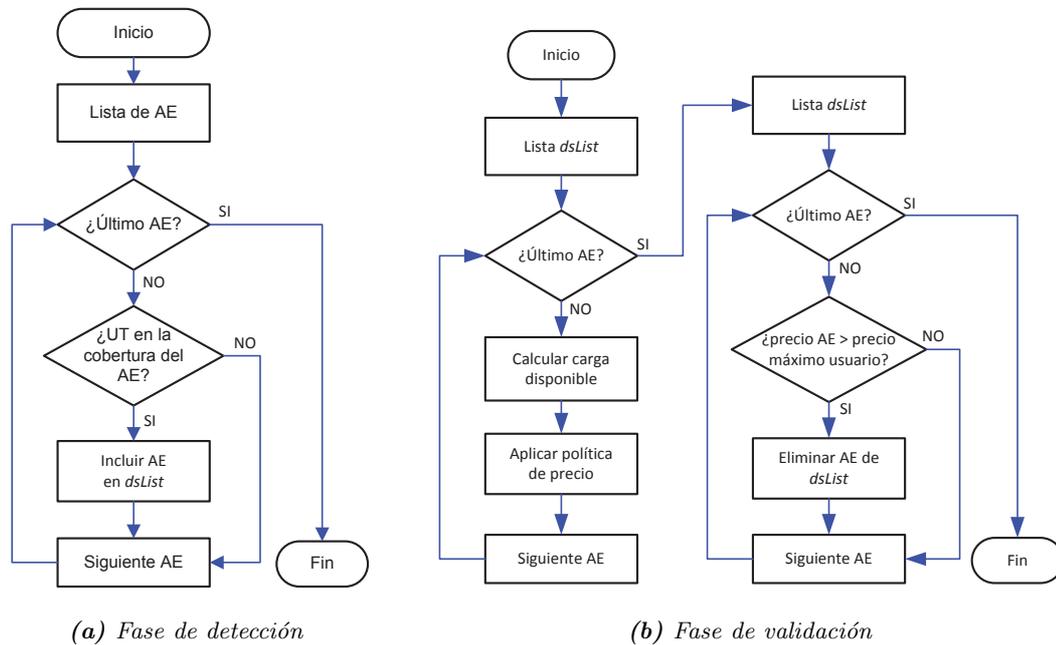


Figura 5.8: Diagramas de flujo de los procedimientos de detección y validación de los AE

principales, que implementan procedimientos específicos para dar soporte a la clasificación de los AE y que permitirán, finalmente, no solo elegir el AE que tenga recursos suficientes, sino, principalmente, el que mejor utilidad ofrezca al usuario.

Detección de elementos de acceso

En esta fase se detectan los elementos de acceso cuya distancia física con el usuario sea menor que el área de cobertura de los mismos. En principio se interroga a todos los AE presentes en el escenario (ver Figura 5.8a), con la excepción en aquellos casos en los que el proceso de selección de acceso haya sido iniciado por un evento *CC_event*. Si un servicio está siendo cursado por un AE y se llega a alcanzar el límite de su cobertura, se produce un evento *CC_event*, en cuyo caso no se considera a dicho AE en la lista de elementos de acceso a ser interrogados porque se asume que ya no cubre al usuario. Todos los AE detectados por este procedimiento se incluyen en una lista, denominada *dsList*.

Validación de accesos

En esta fase se aplica, a cada AE incluido en *dsList*, las políticas de precios que defina el operador al que pertenece, mediante las cuales se determinará el precio que el AE ofrecerá al usuario cuando quiera hacer uso de sus recursos. En general, las políticas de precios definidos en mCASE se basan en la carga libre que actualmente tiene el AE, razón por la cual primero es necesario averiguar ese dato antes de aplicar las políticas correspondientes (ver Figura 5.8b). Si el precio calculado para los recursos del AE es mayor que el que el usuario está dispuesto a pagar, entonces dicho AE es eliminado de la lista *dsList*, y, por tanto, no formará parte del proceso de selección de acceso actual.

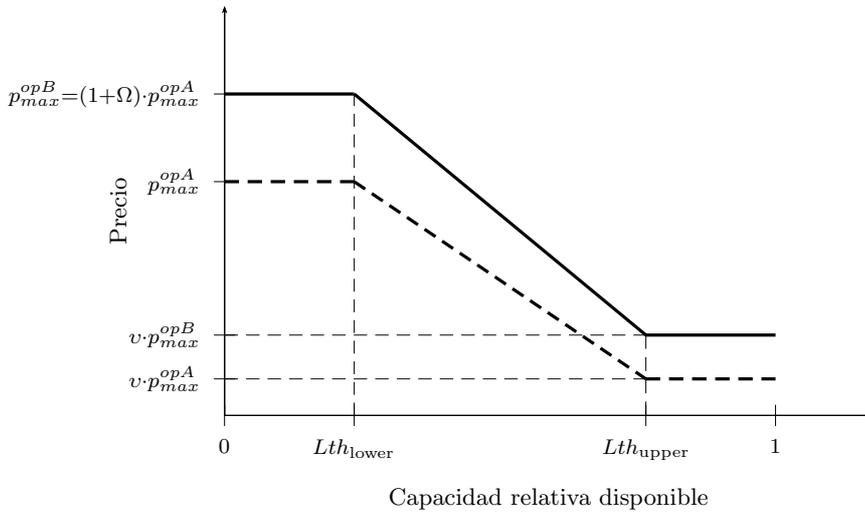


Figura 5.9: Políticas de precio implementadas en mCASE

Tradicionalmente, los usuarios mantienen una relación contractual con un determinado operador y sólo pueden conectarse con los AE que éste gestiona. Tal como se ha descrito en la Sección 2.2, este enfoque puede que cambie en los futuros escenarios de redes inalámbricas, en los que el usuario podrá moverse libremente entre distintos operadores de red, al no estar circunscrito dentro de las fronteras administrativas y tecnológicas que actualmente le limitan. Por otra parte, incluso considerando al usuario dentro del dominio de un operador, éste se encuentra con restricciones económicas debido a las rígidas políticas de precios que suelen aplicar los operadores, que no tienen en consideración los diversos requisitos y preferencias que el usuario pueda tener a la hora de decantarse por una u otra alternativa de acceso. En esta perspectiva se presenta la posibilidad de establecer políticas de precios que involucren elementos de acceso que pertenezcan al mismo (*intra-operator price policy*) o distinto operador (*inter-operator price policy*), de forma similar a como se han propuesto en la literatura [Giupponi et al., 2007], con el objetivo de formar parte fundamental de la gestión de recursos radio, postulando el uso de mecanismos cognitivos tecno-económicos.

El simulador mCASE implementa ambas políticas de precio, mediante una función lineal a tramos que decrece conforme se incrementa la carga libre del AE que está siendo evaluado por el proceso de selección de acceso (ver Figura 5.9). Se establecen dos umbrales (Lth_{lower} y Lth_{upper}), con los que, por una parte, el AE establece su precio máximo (p_{max}^{opA}), disuadiendo al usuario conectarse a un AE cargado; y, por otra, fija el mínimo precio que está dispuesto a ofrecer por sus recursos, en base a un porcentaje (v) del precio máximo.

Para el caso *intra-operator*, mostrada con línea discontinua en la Figura 5.9, el precio ofrecido al usuario se establece considerando que tanto el AE actual (que cursa el servicio en ese momento) como la nueva alternativa de acceso (que el sistema está evaluando como candidato) pertenecen al mismo operador. Si no fuera así, se tendría el caso *inter-operator* (presentada con línea continua en la Figura 5.9), en la cual el operador del AE candidato incrementa su tarifa, aplicando un porcentaje (modelado con el factor Ω) a la función de precio correspondiente a la política *intra-operator*.

Dependiendo de si el servicio se encuentra activo o en reposo en el momento de llamar al proceso de selección de acceso, se presentan diversos casos en los que se aplican ambas

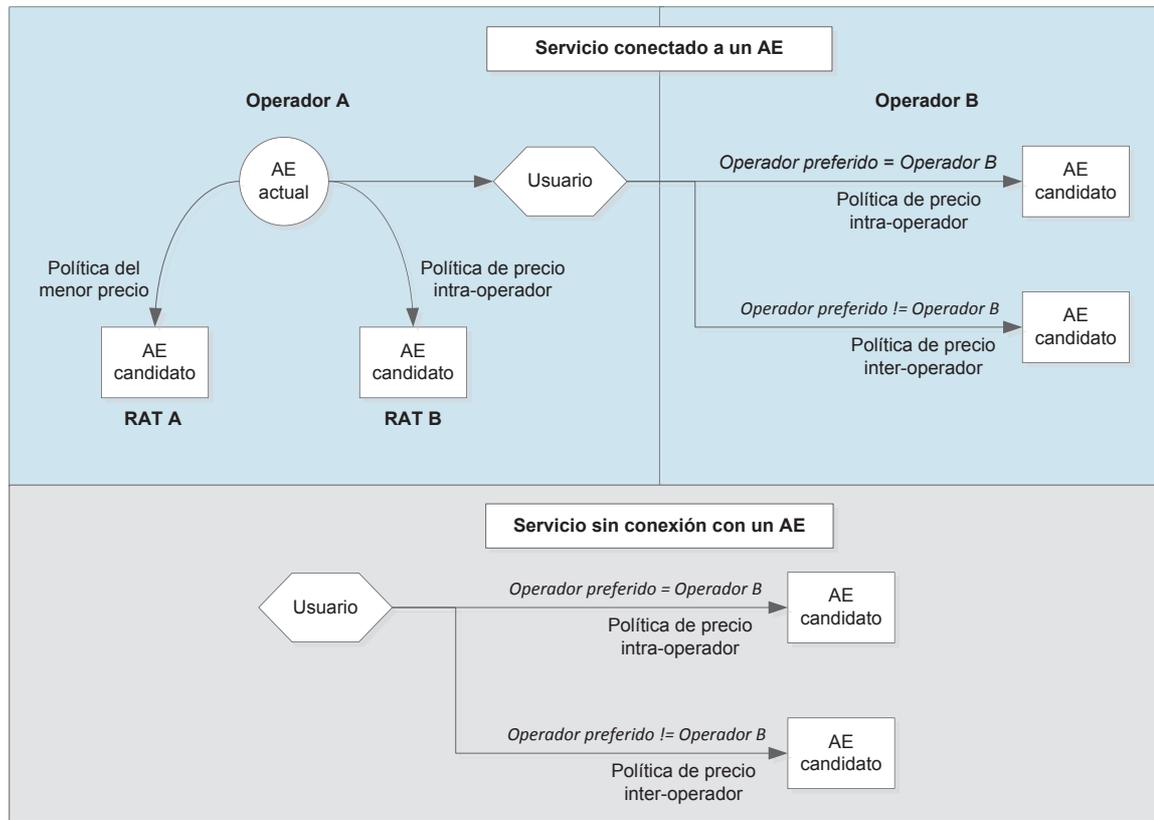


Figura 5.10: Diagrama funcional de las políticas de precio

políticas de precios, tal como se muestra en la Figura 5.10. Asumiendo que el AE actual, por el que se está cursando el servicio, y el AE candidato, que se evalúa como posible alternativa de acceso, pertenecen al mismo operador **A**, se presentan dos casos, dependiendo de que empleen las mismas tecnologías de acceso. Si un usuario hiciera uso de otro AE con la misma tecnología que el actual, se considera que el precio ofrecido al usuario no debería modificarse, al menos de manera desfavorable; por lo tanto, se aplica la **política del menor precio**, que consiste en ofrecer el menor precio entre el que actualmente utiliza el usuario y el solicitado por el AE candidato. En este sentido puede que el AE candidato pida un mayor precio debido a la carga que soporta en ese instante, en cuyo caso se mantendría el precio que el usuario actualmente utiliza; si por el contrario el precio del AE candidato es menor del que está pagando el usuario, éste se vería beneficiado de la oferta ofrecida por dicho AE.

Otra circunstancia se presenta cuando ambos AE se encuentran vinculados a diferentes operadores; el AE actual y el candidato pertenecen a los operadores **A** y **B**, respectivamente. En este caso la política de precio que se aplica dependerá de que coincidan, o no, el operador preferido del usuario con el del AE candidato. Si son el mismo, se aplica la política de precios *intra-operator* y, en caso contrario, se utilizará la correspondiente al *inter-operator*. Esta misma situación se presenta cuando el servicio aún no se encuentra vinculado a ningún AE, que podría producirse por el evento inicio de llamada. Como se puede ver en la Figura 5.10, se aplica la misma lógica, dependiendo del operador preferido del usuario.

Accesos Candidatos

Una vez eliminados, de la lista *dsList*, los AE cuyo precio ofrecido supera aquel que el usuario está dispuesto a pagar, se procede a determinar la utilidad de los AE que quedaron en dicha lista, para establecer la mejor alternativa de acceso posible (ver Figura 5.11). Así, para cada AE del *dsList*, se calcula el valor de la función de utilidad agregada mostrada en la Ecuación (4.1). Se determinan los valores de los criterios que conforman la estrategia utilizada en la simulación y los pesos con los que serán ponderados. Si el servicio estaba conectado a un AE cuando se inició el proceso de selección, el criterio de traspaso (siempre y cuando esté considerado en la estrategia) se incluirá en el cálculo de la función de utilidad agregada.

A continuación, se ordena el *dsList* de forma descendente en base a la utilidad de cada elemento, teniendo de esta forma una lista cuyo primer elemento es el AE con mayor utilidad. Posteriormente, cada elemento de la lista ordenada se interroga acerca de su capacidad disponible, para determinar si tiene recursos suficientes que permitan cubrir los solicitados por el servicio. Si fuera así, el AE se convierte en el acceso seleccionado (**AS**) y, por tanto, finaliza la búsqueda, informando del resultado al procedimiento de petición de recursos, descrito en la Sección 5.2.3; en caso contrario, se continúa con el siguiente AE de la lista. Cuando el AE interrogado es el mismo con el que el servicio ya se encontraba conectado (situación producida, típicamente, por los eventos de monitorización periódica), éste ya tiene reservados los recursos para soportar dicho servicio, por lo que directamente se elige como acceso seleccionado (sin tener que establecer la existencia o no de recursos suficientes). Por otra parte, si la búsqueda finaliza sin encontrar el **AS**, se informaría de esta circunstancia al procedimiento de petición de recursos.

5.2.5. Funcionamiento del simulador mCASE

La operación de la herramienta de simulación mCASE gira alrededor de tres conceptos fundamentales, mostrados en la Figura 5.12, que determinan la manera en la que se utiliza este simulador durante el análisis. El primero es el **escenario**, cuya definición, desde la perspectiva del modelado, ya ha sido introducido en la Sección 4.1.1. Desde el punto de vista de la implementación, un escenario es una clase C++ a partir de la cual se definen todas las entidades y parámetros que forman parte del proceso de selección de acceso. Algunos de ellos describen las características básicas del entorno de simulación, por lo que sus propiedades y comportamientos se mantienen constantes durante todo el análisis. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, los parámetros que definen las dimensiones del escenario y el tiempo que dura la simulación, así como entidades que definen los tipos de usuarios, terminales y elementos de acceso que conforman la red heterogénea. Por otra parte, existen otros elementos cuyo comportamiento se modifica para personalizar el escenario inicial, de acuerdo a los requerimientos del análisis que se quiera llevar a cabo. Estos forman parte del concepto denominado **estrategia**, en base a la cual se especifican, principalmente, los criterios involucrados en el estudio, así como sus correspondientes pesos. También se consideran, dentro de una estrategia, las políticas de precio establecidas por el operador de red, o la tarifa que el usuario está dispuesto a pagar por un servicio, entre otros.

Definido el escenario y la estrategia correspondiente, el simulador mCASE está preparado para llevar a cabo su labor. Llegado a este punto, ejecutar un único experimento puede que no asegure la suficiente fiabilidad estadística los resultados, razón por la cual se llevan a cabo varias **simulaciones** con la misma estrategia (**N** simulaciones por cada una de las **K** estrategias). Así, al inicio de cada nueva simulación, se generan diferentes valores para la

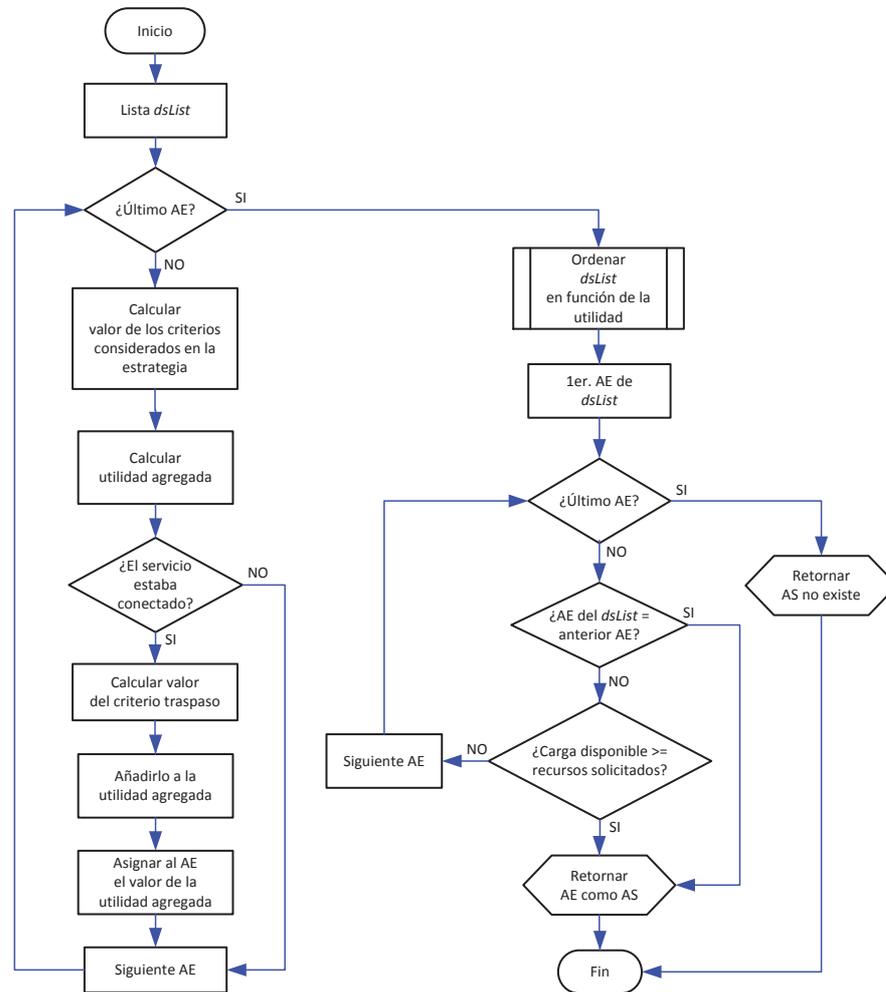


Figura 5.11: Diagrama de flujo del procedimiento de accesos candidatos

posición inicial de los usuarios y sus respectivos patrones de movimiento, así como también para el tráfico correspondiente a los servicios utilizados. Una vez se han ejecutado todas las simulaciones, se realizan los cálculos estadísticos correspondientes (en base a los resultados de cada simulación) para obtener finalmente el rendimiento que ofrece la red de acuerdo a la estrategia elegida.

Por otra parte, para poder replicar posteriormente el escenario que está siendo analizado, mCASE puede ser configurado para registrar (en ficheros denominados **trazas**) todos los cambios que se producen con respecto a los usuarios y servicios durante el tiempo que dura la simulación. De los usuarios se registra la posición en la que se encuentran dentro del escenario en cada instante de tiempo, el tipo de usuario y el operador al que pertenece; por su parte, de los servicios se almacena el estado en el que se encuentra en cada momento. Además de esas trazas en la que la información se guarda dinámicamente conforme evoluciona la simulación, se generan otras que almacenan información estática, válida durante todo el análisis. Estas son las correspondientes a los elementos de acceso (posición, tipo de RAT y operador al que pertenece) y terminales de usuario (posición inicial, tipo de terminal, tipo de usuario, operador preferido y modelo de movimiento) incluidos en el escenario.

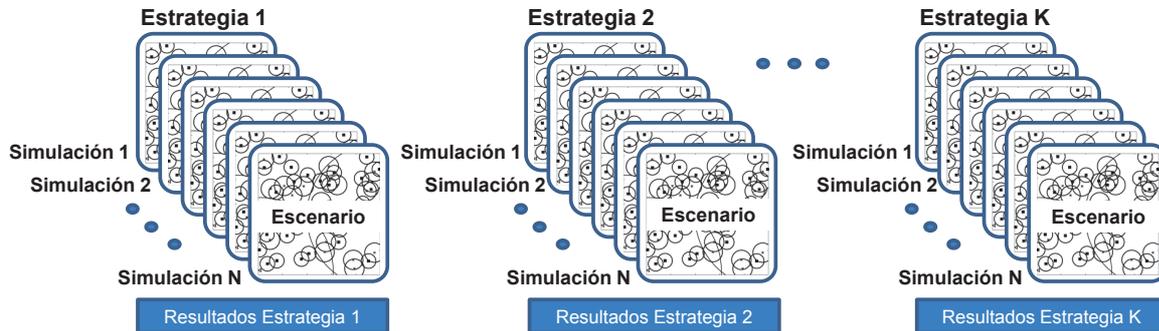


Figura 5.12: Estructura del funcionamiento del simulador mCASE

Existen dos formas de registrar la información de las trazas: por eventos o a intervalos discretos de tiempo, dependiendo de su uso particular. La primera, empleada para poder replicar el escenario posteriormente en otro análisis utilizando la misma herramienta mCASE, registra la información cada vez que ocurre un evento correspondiente al movimiento del usuario o los servicios que está usando; por su lado, la segunda almacena la información en intervalos periódicos de tiempo (denominado **fotografía**) y se utiliza para realizar el análisis del mismo escenario con la herramienta oGASE.

Configuración del escenario

En general, todos los elementos que forman parte del escenario se definen mediante el fichero de configuración *mCASE.cfg*, que proporciona una manera fácil de configurar el simulador, utilizando el siguiente formato para especificar los diferentes parámetros:

```
[SECCIÓN DE CONFIGURACIÓN]
PARÁMETRO_TIPO_1=VALOR
PARÁMETRO_TIPO_2 VALOR1 VALOR2 VALOR3
```

Se pueden incluir parámetros con un solo valor (**PARÁMETRO_TIPO_1**), o que admitan una lista de valores (**PARÁMETRO_TIPO_2**). Por otra parte, el conjunto de parámetros que se pueden especificar en *mCASE.cfg* se puede agrupar en tres categorías: aquellas que definen las entidades que forman parte del proceso de selección de acceso; las relacionadas específicamente con la configuración del escenario; y finalmente las que definen la estrategia que se utilizará en el análisis.

- **Parámetros de configuración.** Estos parámetros están destinados específicamente a la configuración del escenario, definiendo la estructura básica que adoptará durante toda la simulación (ver Figura 5.13).

La sección **[SIMULATION]** incluye algunas de ellas, como los parámetros que definen las dimensiones del escenario (**DIMX** y **DIMY**) y el tiempo que dura la simulación (**TIME**); mientras que los parámetros **STRATEGY** y **NUMSIM**, definen la estrategia y el número de simulación que se está ejecutando. La sección **[SNAPSHOT]** permite realizar las fotografías mencionadas anteriormente, con una frecuencia indicada con **STEP**; activando o desactivando dicha funcionalidad mediante el parámetro **SETUP**, e indicando un prefijo numérico (**FILE**) que se añadirá a cada traza, para distinguir un fichero de otro.

La sección [TRACEFILES] contiene los parámetros relacionados con la generación de trazas para replicar el escenario posteriormente dentro de otro análisis con la misma herramienta mCASE. El parámetro SETUP configura el simulador para activar/desactivar la producción de trazas, o cargar otras anteriormente generada para realizar un nuevo análisis. También permite especificar los nombres de los ficheros de trazas.

La sección [MONITORING] contiene parámetros de configuración relacionados con diversos procedimientos de monitorización del sistema. La primera establece los eventos de la monitorización periódica explicada en la Sección 5.2.2; se puede activar/desactivar dicho procedimiento con PMSETUP y fijar el intervalo de tiempo de cada evento con PMSTEP. Por su parte, LQSTEP y LDSTEP se definen con fines estadísticos. LQSTEP especifica, como un porcentaje del tiempo de servicio, el intervalo de tiempo en el que se evaluará la calidad del enlace; mientras LDSTEP establece, en base a un porcentaje del tiempo de la simulación, los instantes en los cuales se determinará la carga soportada por todos los AE involucrados en el análisis.

Finalmente, la sección [STATISTICS] incorpora parámetros que activan/desactivan la generación de información estadística relacionada con las diferentes figuras de mérito que evalúan el rendimiento del sistema durante la simulación.

- **Parámetros de las entidades.** En base al modelado de las entidades de mCASE realizado en la Sección 4.1.1, estos parámetros definen las entidades específicamente involucradas en el escenario, así como sus correspondientes propiedades (ver Figura 5.14).

La sección [RATS] incluye la información de los tipos de tecnología radio que usarán los terminales y elementos de acceso; están caracterizadas por su cobertura (RANGE) y los recursos que soporta (CAPACITY). Dependiendo del número de tipos de RAT presentes en el escenario, especificado en TYPES, se contara con igual número de secciones para definir cada uno de ellos, identificándolas mediante el sufijo *n* correspondiente al *n*-ésimo tipo de RAT ([RAT*n*]). Este formato se utilizará, de forma similar, en la definición de las demás entidades de red.

En la sección [TERMINALS] se definen los tipos de terminales utilizados en la simulación, indicando para cada uno de ellos los tipos de RAT que incorpora (RATID), y la probabilidad de que un usuario tenga un terminal de ese tipo (PROBABILITY).

Los tipos de servicios que pueden usar los usuarios se especifican en la sección [SERVICES]. Están caracterizados por el tiempo de reposo y actividad que presentan (TOFF y TON, respectivamente), dependiendo del tipo de servicio que se desea modelar (datos, voz, video, etc.), y el número de recursos que requieren para ser cursados (CAPACITY).

La sección [USERS] define el tipo y número de usuarios involucrados en el estudio. Para cada tipo se indican los servicios que puede utilizar, el precio máximo que el usuario está dispuesto a pagar por ellos, y la probabilidad de que un usuario sea de ese tipo.

La sección [MOVEMENTS] especifica los tipos de patrones de movimiento que puede utilizar un usuario a la hora de desplazarse dentro del escenario. Dependiendo del tipo de movimiento que se desea modelar (usuario desplazándose como peatón, en un vehículo, etc.), los parámetros correspondientes adoptarán distintos valores. En el marco de esta Tesis todos los tipos de movimiento se basan en el modelo *Random WayPoint*, descrito en la Sección 5.2.1, para el cual se definen los valores mínimo y máximo de la velocidad con la que se desplaza el usuario (SPEEDMIN y SPEEDMAX), el tiempo que se mantiene

en movimiento (TIMEMIN y TIMEMAX), y el tiempo que permanece en pausa después de cada movimiento (PAUSEMIN y PAUSEMAX).

En la sección [BASESTATIONS] se configuran los tipos de elementos de acceso que se utilizan en la simulación, en base al tipo de RAT que incorpora (RATID) y la distancia mínima que se debe mantener con otros AE del mismo tipo (MINDISTANCE).

Finalmente, la sección [OPERATORS] define los operadores presentes en el escenario, cada uno caracterizado por los n tipos de AE que utiliza, y el número de AE (x) que desplegará, correspondiente a cada tipo ([BS n]= x). También se incluye, para cada tipo de operador, los parámetros que definen la función de precio de las políticas mostradas en la Figura 5.9. El parámetro PRICEBS n define el precio máximo de la función (p_{max}^{op}), BPRICEFACTOR indica el valor del factor (v) que se aplica a la tarifa máxima para establecer el correspondiente valor mínimo, y OPPRICEFACTOR establece el valor del factor Ω utilizado en la política de precio *inter-operator*. Para completar la definición de la función de precio, en la sección [PRICEPARAMS] se especifican los valores de los umbrales Lth_{lower} y Lth_{upper} , mediante los parámetros LOWERTHRLOAD y UPPERTHRLOAD, respectivamente.

- **Parámetros de las estrategias.** Estos parámetros personalizan el comportamiento del escenario para adaptarlo a los objetivos del estudio que se desea realizar; definiendo, de esta manera, la estrategia a ser utilizada durante el análisis (ver Figura 5.15).

Una de las secciones más importantes de esta categoría es [CONSTRAINTS], en la cual se especifican todos los criterios implementados en el simulador. Dependiendo de la estrategia a analizar se asigna un peso a cada criterio, que será cero si no se desea considerarlo en el análisis.

Mediante la sección [MARKETSHARE] se puede detallar la distribución del mercado entre los operadores involucrados en el escenario. Así, define el porcentaje de usuarios que considera al operador OP n como su preferido a la hora de realizar un proceso de selección de acceso.

Finalmente, la sección BUSINESSMODEL especifica el comportamiento que adopta la entidad *Access Broker* (descrita en la Sección 4.1.1), estableciendo las reglas que definen las relaciones tecno-económicas entre los operadores involucrados en el escenario.

5.3. oGASE

En este capítulo se detallan los aspectos relacionados con la implementación del modelo oGASE, descrito en la Sección 4.2. Al igual que mCASE, este simulador ha sido desarrollado desde cero, siguiendo el paradigma de programación orientada a objetos, en concreto con C++. Su funcionalidad mantiene una estrecha relación con la herramienta mCASE, por lo que en la explicación de los diferentes aspectos de oGASE se utilizarán los conceptos previamente definidos; además, dicho vínculo causa que en la implementación de muchas de sus estructuras se tengan en consideración los principios de diseño empleados en el desarrollo de la herramienta mCASE. En este sentido, oGASE tiene la capacidad de realizar el análisis sobre escenarios de redes heterogéneas, con un elevado número de entidades de red de diversa tipología (elementos de acceso, terminales, usuarios), estando además preparada para que el usuario pueda hacer uso de varios servicios simultáneamente, incluso empleando diferentes

<pre>[SIMULATION] DIMX=1000 DIMY=1000 TIME=3600 STRATEGY=008 NUMSIM=100 [SNAPSHOTS] SETUP=OFF FILE=001 STEP=10 [TRACEFILES] SETUP=NO_TRACES #SETUP=MAKE_TRACES #SETUP=LOAD_TRACES MOVEMENT_TRACE_FILE=movements.trc SERVICE_TRACE_FILE=services.trc UTS_LIST_FILE=utslist.trc BSS_LIST_FILE=bsslist.trc</pre>	<pre>[MONITORING] PMSETUP=ON PMSTEP=0.25 LQSETUP=ON LQSTEP=0.10 LDSTEP=0.05 [STATISTICS] SERVICE_STATS=ON USER_STATS=ON LINKQUALITY_STATS=ON HOPERSERV_STATS=ON HOPERUSER_STATS=ON LOAD_STATS=ON PARAMSLIST=ON PRICELIST=ON PRICEPERSERV_STATS=ON PRICEPERUSER_STATS=ON</pre>
---	--

Figura 5.13: Parámetros de *mCASE.cfg* relacionados con la configuración

alternativas de acceso. Por su parte, a diferencia de *mCASE*, la herramienta *oGASE* ha sido diseñada para determinar el rendimiento óptimo que puede darse en la red, lo que en algunos casos conllevar la realización de intensas tareas de simulación. Por ello, *oGASE* se basa en una arquitectura cliente-servidor, permitiendo distribuir la carga computacional que requiere sobre recursos que pueden estar alojados en diversas máquinas.

Tal como se analiza en [Falowo y Chan, 2008], la optimización representa uno de los aspectos fundamentales a ser considerados en los procesos de selección de acceso. Así, llama cada vez más la atención de los organismos de estandarización, como el 3GPP, que está promoviendo el concepto de *Self-Organizing Network* (SON) [Hu et al., 2010] en el ámbito de la tecnología LTE. Por su parte, la comunidad científica hace uso de diversas técnicas de optimización, como las descritas en la Sección 2.4.3. Aunque el uso de las técnicas de programación lineal pueda ser una elección apropiada para acometer la búsqueda del rendimiento óptimo del sistema, en la literatura no existen muchos trabajos que hayan aprovechado sus posibilidades. Algunos hacen uso de una estructura rígida a la hora de abordar el planteamiento del problema, o incluyen un reducido número de criterios dentro de su análisis, que limitan el alcance de los resultados [Falowo y Anthony Chan, 2008] [Karthikeyan Krishnasamy y Narayanasamy Palanisamy, 2006] [Poyhonen et al., 2007]. Una propuesta que se aproxima más a *oGASE* es la que se describe en [Pirmez et al., 2010]; sin embargo, los autores no persiguen la optimización global de todo el escenario, sino que se centran en un conjunto específico de usuarios (aquellos que se encuentren conectados a una misma estación base). Además, no consideran la posibilidad de que los usuarios hagan uso de varios servicios sobre diferentes tecnologías de acceso, ya que en su propuesta, una vez que el usuario se ha conectado a la red, usa dicha conexión para cursar todos sus servicios. Otro trabajo interesante es el descrito en [Lucas-Estañ et al., 2012], en la que los autores también utilizan técnicas de programación lineal, aunque en este caso para maximizar la menor de las utilidades. Además, consideran que los usuarios solo pueden recibir simultáneamente recursos de una RAT; por tanto, al igual que como sucede con [Pirmez et al., 2010], no se permite la transmisión simultánea de tráfico sobre diferentes interfaces. Finalmente, cabe resaltar el estudio realizado por los autores con respecto a la posibilidad de implementar este tipo de

<pre>[RATS] TYPES=3 [RAT0] RANGE=600 CAPACITY=16 [RAT1] RANGE=600 CAPACITY=20 [RAT2] RANGE=60 CAPACITY=30 [TERMINALS] TYPES=2 [TERMINAL0] PROBABILITY=0.60 RATID 0 [TERMINAL1] PROBABILITY=0.40 RATID 1 2 [SERVICES] TYPES=2 [SERVICE0] TOFF=120 TON=60 CAPACITY=1 [SERVICE1] TOFF=120 TON=180 CAPACITY=1</pre>	<pre>[USERS] NUMBER=250 TYPES=2 [USER0] PROBABILITY=0.7 SERVICES 0 1 PRICE=0.80 [USER1] PROBABILITY=0.3 SERVICES 0 PRICE=1.0 [MOVEMENTS] TYPES=1 [MOVEMENT0] MODEL=RWP_REFLECT PROBABILITY=1 SPEEDMIN=1 SPEEDMAX=3 TIMEMIN=1000 TIMEMAX=1200 PAUSEMIN=50 PAUSEMAX=70 [BASESTATIONS] TYPES=3 [BS0] RATID=1 MINDISTANCE=400 [BS1] RATID=2 MINDISTANCE=400 [BS2] RATID=3 MINDISTANCE=20</pre>	<pre>[OPERATORS] TYPES=2 [OPERATOR0] BS0=3 BS1=0 BS2=0 BS3=0 PRICEBS0=1.00 PRICEBS1=0 PRICEBS2=0 BSPRICEFACTOR=0.10 OPPRICEFACTOR=0 [OPERATOR1] BS0=0 BS1=4 BS2=20 PRICEBS0=0 PRICEBS1=1.00 PRICEBS2=1.00 PRICEBS3=0.60 BSPRICEFACTOR=0.10 OPPRICEFACTOR=0 [PRICEPARAMS] LOWERTHRLD=0.2 UPPERTHRLD=0.8</pre>
---	--	---

Figura 5.14: Parámetros de mCASE.cfg que definen las entidades

propuestas en entornos reales, evaluando el tiempo de ejecución llevado a cabo por el *solver* de programación lineal en procesadores similares a los utilizados en las estaciones base.

5.3.1. Funcionamiento del simulador oGASE

El mantener un vínculo con mCASE hace que la operación de la herramienta oGASE también englobe los tres conceptos definidos en la Sección 5.2.5: escenario, estrategia, y simulación, tal como se muestra en la Figura 5.16. El escenario define la estructura de la red y los elementos relacionados con la selección de acceso; la estrategia ajusta un conjunto de parámetros del escenario para adaptarlo a los objetivos del análisis; una vez definidos ambos, se cuenta con un escenario “personalizado”, con el que se realizan varios ejercicios de simulación para lograr resultados con validez estadística. Por su parte, para que oGASE pueda replicar el mismo escenario utilizado en mCASE, éste último tiene que proporcionar la información necesaria. Así, toma relevancia el concepto de **traza**, que es un fichero generado periódicamente durante el tiempo que dura la simulación en mCASE, en el que se guardan, principalmente, la posición de los usuarios en el escenario y el estado de los servicios que utilizan, en ese momento. En definitiva, la traza se corresponde con la implementación del concepto **fotografía**, introducido durante la descripción del modelado de oGASE (Sección 4.2), y, por tanto, representa la información más importante que se proporciona al simulador oGASE, de la cual se derivan no solo la réplica del escenario bajo análisis sino, principalmente, la unidad básica de optimización.

```

[CONSTRAINTS]
QUALITY=0.00
HANDOVER=0.50
OPERATOR=0.00
LOAD=0.00
PRICE=0.50

[MARKETSHARE]
OP0=0.75
OP1=0.25

[BUSINESSMODEL]
TYPES=1
[BUSINESS0]
MODEL=COOPERATIVE
OPID 0 1
#[BUSINESS1]
#MODEL=COMPETITIVE
#OPID 0 1

```

Figura 5.15: Parámetros de *mCASE.cfg* que especifican las estrategias

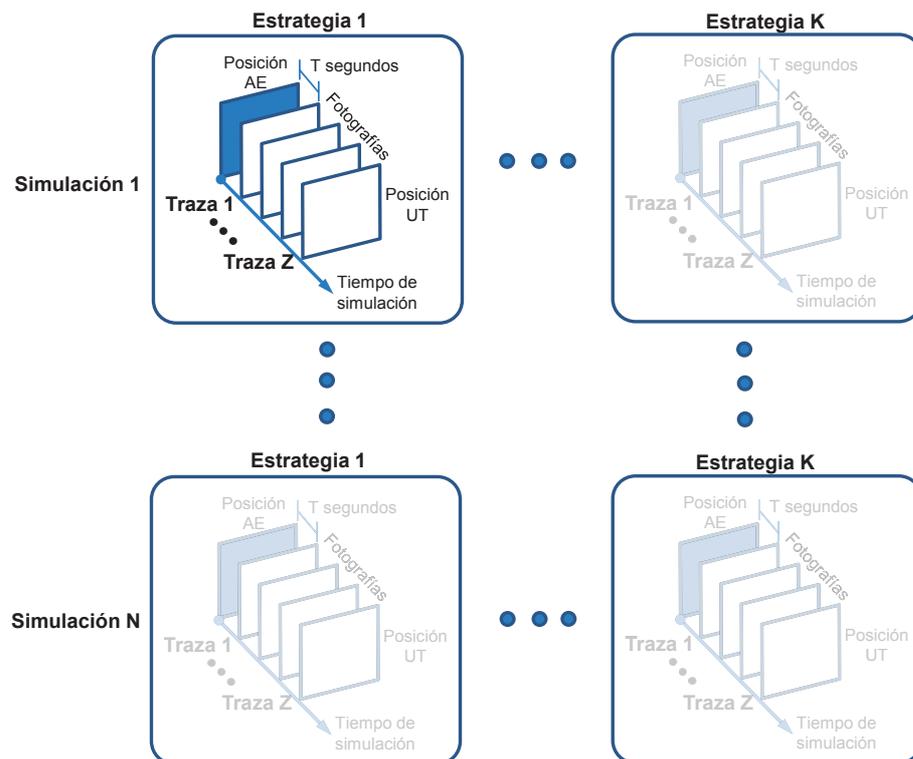


Figura 5.16: Estructura del funcionamiento del simulador oGASE

El simulador mCASE genera un conjunto de trazas, que sirven de entrada al oGASE, y que son de dos tipos: aquellas que recogen la información relacionada con los usuarios, y otro fichero que almacena los datos correspondientes a los elementos de acceso. Con respecto al primer conjunto de ficheros, dependiendo de la frecuencia con que se toman las fotografías, definida en la sección [SNAPSHOT] del fichero de configuración *mCASE.cfg*, se producirán un

determinado número de ficheros de trazas. Dentro de ellas, habrá una fila para cada uno de los usuarios involucrados en el escenario, según el formato que se muestra seguidamente.

USER_ID	POS_X	POS_Y	TERMINAL_TYPE	USER_TYPE	OPERATOR_TYPE	SERV_0	SERV_1	...
---------	-------	-------	---------------	-----------	---------------	--------	--------	-----

Tal como se comentó en la Sección 4.2.1, *oGASE.cfg* replica muchos de los parámetros incluidos en el fichero de configuración de mCASE, por lo que para interpretar la información de los ficheros de trazas se recurre a la estructura descrita en la Sección 5.2.5. Así, se indica el tipo de terminal que utiliza el usuario (*TERMINAL_TYPE*), lo que determina el conjunto de tecnologías de acceso que podrá utilizar; el tipo de usuario correspondiente (*USER_TYPE*), lo que establece los servicios que podrá iniciar; el operador (*OPERATOR_TYPE*) al que considera como preferido; la posición en la que se encuentra en el momento de realizarse la fotografía (*POS_X* y *POS_Y*); el estado de los servicios que está utilizando (*SERV_0*, *SERV_1*, etc.), y, finalmente, se utiliza el campo *USER_ID* para identificar a cada usuario de manera unívoca. Por otra parte, es importante destacar el significado de dichos parámetros en función de la perspectiva con que se interpretan. Para oGASE, el estado de los servicios representa la intención que tiene el usuario por conectarse, aunque desde el punto de vista de mCASE simplemente indique que el servicio se encuentra activo o en reposo; además, teniendo en cuenta que el par **usuario-servicio** no se considera en el marco del modelo mCASE, cada fila de dicha traza se corresponde con un único usuario, y no con un par usuario-servicio, construyendo oGASE, posteriormente, cada dupla durante el proceso de despliegue de la red.

El otro tipo de fichero, incluido en el grupo de trazas que oGASE recibe, se corresponde con los elementos de acceso del escenario. Como sus características y posición son fijos durante todo el análisis, mCASE solo genera un único fichero. Al igual que en el caso de los usuarios, tendrá una línea por cada elemento de acceso, de acuerdo al formato que se indica a continuación.

BS_ID	POS_X	POS_Y	BS_TYPE	OPERATOR_TYPE
-------	-------	-------	---------	---------------

Recoge la posición del elemento de acceso dentro del escenario, mediante las coordenadas cartesianas *POS_X* y *POS_Y*; el tipo de elemento de acceso al que pertenece *BS_TYPE*, lo que determina la tecnología que utiliza; y, el operador que lo gestiona *OPERATOR_TYPE*. Finalmente, el campo *BS_ID* identifica unívocamente a cada elemento de acceso.

5.3.2. Arquitectura software de oGASE

En esta sección se describe la estructura de alto nivel del simulador oGASE, así como sus propiedades globales. Se definen los componentes que lo integran, la interacción que existe entre ellos durante la ejecución de la herramienta, y el modelo arquitectónico cliente-servidor sobre la que se sustenta, entre otros.

Considerando que un estudio dentro de oGASE implica utilizar **K** estrategias, con **N** simulaciones independientes para cada una de ellas, y asumiendo que se toman **Z** fotografías por cada escenario, el número de trazas que se tienen que procesar ($K \times N \times Z$) puede llegar a ser bastante elevado. Cada una de ellas deriva en un proceso de optimización independiente, que en general requiere de relevantes recursos computacionales. Además, es necesario gestionar los cambios producidos en el escenario para reflejar las estrategias que se desean analizar, así como procesar los resultados al finalizar la optimización de todas las fotografías, entre otros procesos. Llevar a cabo todos estos procedimientos, a la vez que sea complejo, hace que el

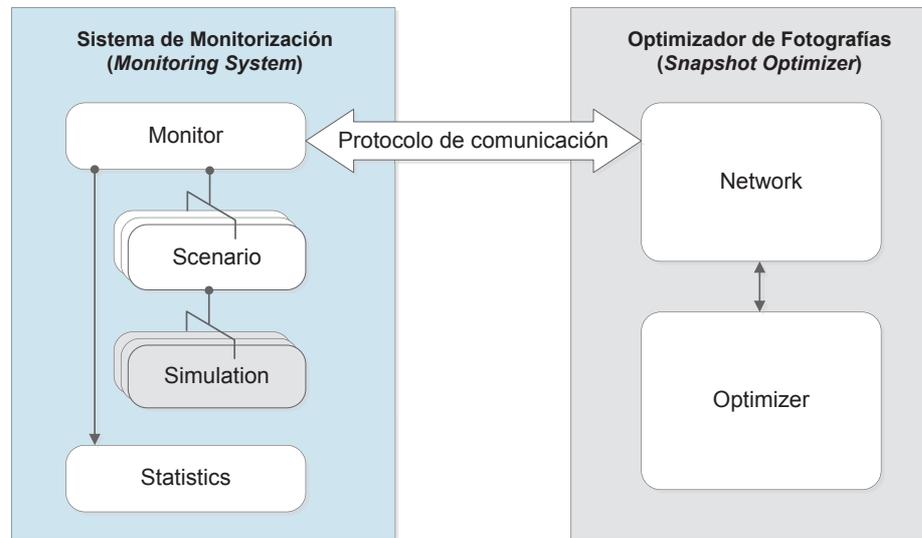


Figura 5.17: Arquitectura software de oGASE

sistema oGASE tenga una considerable carga computacional, por lo que se ha optado por utilizar un modelo cliente-servidor a la hora de realizar su diseño e implementación.

La Figura 5.17 muestra el rol que cumple cada entidad de la herramienta oGASE dentro de la arquitectura cliente-servidor. El *Snapshot Optimizer* actúa como la parte activa de dicho patrón arquitectónico, es decir, desempeña el papel de **cliente**; como tal, demanda los servicios de la entidad que actúa como servidor, esperando una respuesta a cada petición que realiza. Por otra parte, el *Monitoring System* toma el rol de **servidor**; así, como parte pasiva, espera las peticiones de los clientes, procesándolas y enviando la correspondiente respuesta. Bajo este enfoque, el *Snapshot Optimizer* podría ejecutarse en diferentes máquinas, o en diferentes procesos dentro de una, dando la posibilidad de simular múltiples escenarios simultáneamente, lo que permitiría reducir considerablemente el tiempo para llevar a cabo todo el análisis. Además, considerando que las peticiones realizadas por el *Snapshot Optimizer* no requieren de un intenso cálculo computacional, por lo que su tiempo de respuesta es pequeño, se ha optado por implementar el *Monitoring System* como un servidor de tipo secuencial, diseñado para procesar una solicitud cada vez. Por otra parte, para comunicar los dos componentes del modelo cliente-servidor, se ha diseñado y desarrollado un protocolo basado en TCP, garantizando la fiabilidad necesaria durante el intercambio de la información.

5.3.3. Módulo cliente: *Snapshot Optimizer*

Este módulo consta de dos clases principales: *Network* y *Optimizer*, que se combinan para cumplir el objetivo principal del *Snapshot Optimizer*: realizar la optimización de cada una de las fotografías correspondientes a un determinado escenario. En el momento que se inicia este módulo, recopila los datos que le permitan construir el escenario, acudiendo para ello al fichero de configuración *oGASE.cfg*. Posteriormente, crea los objetos correspondientes a las dos clases, que serán las encargadas de llevar a cabo el resto de procedimientos, tal y como se describe a continuación.

- **Clase *Network*.** Procesa las trazas proporcionadas por mCASE, para establecer los cambios producidos a lo largo de las fotografías. Posteriormente, realiza una petición a

la clase *Monitor*, para que le informe de lo acontecido en la fotografía anterior. Esto le permitirá conocer, por ejemplo, los pares usuario-servicio que deben ser optimizados, el precio que pagan por la conexión activa (para tenerlo en cuenta en el sistema de facturación del usuario), la carga de las estaciones base (para ejecutar las funciones de balanceo de carga y para definir el precio que establecen los operadores). Con todos los datos recabados, procede a la implementación del problema de optimización, conformando para ello la matriz de restricciones y la función objetivo, para que sea resuelta por la clase *Optimizer*. Finalmente, después de recibir los resultados de la optimización, procede a enviárselos a la clase *Monitor*.

- **Clase *Optimizer*.** Se encarga fundamentalmente de encontrar las soluciones al problema de optimización construido por la clase *Network*. Para ello, después de recibir toda la información necesaria, se lo envía al *solver* a través del API correspondiente, con el fin de resolver el problema. Finalizada la ejecución del *solver*, se procede a obtener los resultados, que consisten principalmente en el conjunto de pares usuario-servicios que han resultado conectados, para enviárselo al *Monitoring System*.

El *solver* que se emplea es el **GLPK** (*GNU Linear Programming Kit*) [Makhorin, 2014]; una herramienta de software libre, desarrollada en ANSI C, y que puede ser utilizada como librería externa. Su misión es la de resolver problemas de optimización en base a las técnicas de programación lineal (*Linear Programming*, LP) y de programación lineal entera mixta (*Mixed Integer Programming*, MIP).

Considerando que toda la lógica de la programación de este módulo sigue las líneas generales establecidas durante su modelado (ver Sección 4.2.1), a continuación se detalla únicamente la implementación de los procedimientos más relevantes.

Resultados de la fotografía previa

Esta tarea se realiza dentro de la clase *Network*. Una vez que se conoce la estructura de la red que se utilizará durante el análisis, la ubicación de los usuarios, así como sus intenciones de conectarse, se realiza un análisis previo a la resolución del problema de optimización; partiendo de la información disponible, se calculan otros datos necesarios para que el GLPK disponga, en sus funciones, los elementos de entrada que requiere para llevar a cabo su cometido.

Uno de los aspectos fundamentales que se debe tener en cuenta es que, a pesar de que se tiene toda la información correspondiente a la fotografía actual, la optimización no se realiza únicamente en base a ella, sino que también se necesita información sobre lo acontecido en la fotografía anterior, para resolver el problema correctamente. Cabe recordar que, aunque el *Snapshot Optimizer* tiene vigencia durante el procesado de todas las fotografías, los únicos datos que quedan almacenados entre dos consecutivas son los correspondientes a la configuración general del escenario, cargada desde el fichero *oGASE.cfg*. El *Monitoring System* es el encargado de almacenar y tratar los datos de las fotografías ya procesadas, para enviarlo nuevamente al *Snapshot Optimizer* cuando éste lo requiera.

A continuación se describen los resultados más relevantes de la fotografía anterior, así como la información que se extrae a partir de ellas, imprescindibles para acometer el proceso de optimización de la fotografía vigente.

- **Estación base.** A partir de la estación base a la que estuvo conectado cada par usuario-servicio en la fotografía anterior, se pueden calcular diferentes parámetros. Por una

parte, se utiliza en el sistema de gestión de precios para comparar las propiedades de la estación base anterior (operador y tecnología de acceso) con las actuales alternativas potenciales y, en función de estos valores, decidir si es necesario establecer nuevamente el precio facturado. También se emplea en las restricciones aplicadas a los pares usuario-servicio, ya que un usuario conectado en la fotografía anterior no debería afrontar un aumento de precio si mantiene su mismo operador y RAT. Finalmente, permite a los criterios de la función objetivo que usan dicha información, calcular su valor, como, por ejemplo, el relacionado con el traspaso.

- **Carga de la estación base.** Este dato permite calcular, en base a la política de precios aplicada por el operador, la tarifa que cada estación base ofrecerá a los usuarios por el uso de sus recursos. Cabe resaltar que esta se calcula a partir de la carga que tenía la estación base en la fotografía anterior, ya que la actual no se puede determinar porque dependerá del resultado del proceso de optimización.
- **Facturación del usuario.** Si un usuario no cambia de operador ni de tipo de tecnología de acceso a lo largo de una llamada, la tarifa que está pagando no debería verse modificada. Para ello es necesario conocer el precio que el par usuario-servicio había pagado en la fotografía anterior.
- **Pares optimizables.** A partir de los resultados de la fotografía anterior y de las intenciones de los usuarios en la actual, el *Monitoring System* determina los pares usuario-servicio que deberían formar parte del problema de optimización. La clase *Network* recibe sus identificadores, para cargar la información correspondiente, y, a partir de ello, ir calculando los coeficientes del problema.

Adicionalmente, es necesario ejecutar otras rutinas para completar la información que necesita el GLPK para llevar a cabo la optimización. Entre ellas, se necesita determinar la conectividad física que pueda existir entre cada una de las combinaciones de usuario y estación base involucradas en el escenario; es decir, se comprueba que un usuario puede conectarse a una determinada estación base, cuando se encuentra dentro de su rango de cobertura. En caso de que exista conectividad se registra, para cada usuario, las estaciones base a las que pueda conectarse y, de la misma manera, para cada estación base, cuáles son los usuarios que están dentro de su zona de cobertura. Por otra parte, también es necesario averiguar la tarifa que la estación base establece por el uso de sus recursos, utilizándose para ello su carga y la política de precios del operador.

Problema de optimización

Para la implementación del problema de optimización y su resolución, es necesario llevar a cabo un intenso intercambio de información entre las clases *Network* y *Optimizer*. En concreto, la clase *Network* convierte la información disponible del escenario en datos que puedan ser interpretados por el GLPK, mientras que la clase *Optimizer* se comporta como un *wrapper*, gestionando el API del GLPK, para ejecutar las rutinas específicas de optimización.

Para comenzar, es necesario suministrar a la librería GLPK todos los parámetros de configuración que requiere, para conformar adecuadamente el problema. A continuación se describen los parámetros necesarios en este punto.

1. **Creación del problema.** La clase *Network* comunica a *Optimizer* el número de variables y restricciones del problema. Para ello, suministra el número de usuarios (U),

de servicios (\mathbf{S}) y de estaciones base (\mathbf{N}), que forman parte del escenario y, a partir de ellos, se establece la cantidad de variables básicas ($\mathbf{U} \times \mathbf{S} \times \mathbf{N}$), y el número de restricciones ($\mathbf{U} \times \mathbf{S} + \mathbf{N}$) que definirán el problema de optimización. Con estos datos, la clase *Optimizer* ejecutará las siguientes funciones GLPK:

- Creación del problema en la librería (`lpx_create_prob`)
 - Asignación de un nombre al problema (`lpx_set_prob_name`)
 - Tipo de resolución deseada, en este caso MIP (`lpx_set_class`)
 - Sentido de la optimización, para el caso de oGASE siempre será la maximización (`lpx_set_obj_dir`)
2. **Configuración del problema.** Se establecen los límites del problema de optimización, que serán, por una parte, la capacidad de las estaciones base, que limitan el número de conexiones que se puede cursar; y, por otra, el hecho de que un par usuario-servicio no puede estar conectado simultáneamente a más de una estación base. Las funciones GLPK utilizadas para este cometido son las siguientes:
- Se añaden todas las filas de la matriz de restricciones del problema (`lpx_add_rows`)
 - Se fijan los límites para cada par usuario-servicio y para cada estación base (`lpx_set_row_bnds`)
 - Se añaden tantas columnas como número de variables básicas (`lpx_add_cols`)
 - Se establecen los límites para cada columna, siendo éstos 0 y 1, por tratarse de variables binarias (`lpx_set_col_bnds`)
 - Se asigna un nombre a cada columna, coincidiendo con el índice asignado a cada coeficiente distinto de 0 de la función objetivo.
3. **Generación de la matriz de restricciones.** Este procedimiento se lleva a cabo en la clase *Network*, ya que dispone de toda la información necesaria. La matriz está constituida por un número de columnas que se corresponde con las variables básicas del problema; esto es, tendrá $\mathbf{U} \times \mathbf{S} \times \mathbf{N}$ columnas. En cuanto a las filas, están formadas por dos partes diferenciadas: aquellas correspondientes a los pares usuario-servicio ($\mathbf{U} \times \mathbf{S}$ filas) y las de las estaciones base (\mathbf{N} filas), tal como se muestra en la Figura 5.18. Para los pares usuario-servicio, cada elemento representa la posibilidad de conexión del par i, k con la estación base j , tomando el valor de 1.0 en el caso de que sea un par optimizable, y 0.0 en caso contrario. Por su parte, en función de las posibilidades de conexión establecidas en las filas anteriores, los elementos de las filas correspondientes a las estaciones base recogerán la capacidad requerida por el servicio a optimizar. Adicionalmente, el GLPK tiene en cuenta otras restricciones, de cara a obtener resultados adecuados; cada par usuario-servicio sólo puede resultar conectado a una estación base. Con respecto a las filas de las estaciones base, se debe cumplir que la suma de las capacidades de los servicios cursados por una estación base, no supere su capacidad.
- Esta matriz tiene un tamaño considerable, sobre todo cuanto mayor sea el número de usuarios, servicios y estaciones base. Esto complica el proceso de introducir su información al GLPK, consumiendo innecesariamente recursos computacionales. Por ello, se hace uso de una estructura que únicamente almacena los elementos distintos de 0.0; utilizando sendos vectores que almacenan, para cada fila, la posición que ocupa el elemento en la matriz y su valor correspondiente. El conjunto de todos esos vectores es lo

que en definitiva se envía a la clase *Optimizer*, que utiliza la función `lpx_set_mat_row` para introducirlo en el GLPK.

4. **Generación de la función objetivo.** Para construir la función objetivo es necesario calcular el valor de los coeficientes que se van aplicar a las variables básicas. Posteriormente, las rutinas de GLPK se encargarán de maximizar esta función, de acuerdo a los límites y restricciones mencionadas anteriormente. Cabe resaltar que esta función únicamente considera aquellas variables básicas correspondientes a los pares usuario-servicios que han sido identificados como “optimizables” por el *Monitoring System*, lo que permite reducir significativamente el tiempo de procesamiento del simulador. Adicionalmente, del conjunto de pares enviados por el *Monitoring System*, se eliminan aquellos que no cumplen con las restricciones de conectividad física y de precio, descritas anteriormente.

El coeficiente está definido por la función de utilidad agregada u_{ijk} , según el modelado de la función objetivo (Sección 4.2.3). Así, cada uno se calcula como la suma de los valores correspondientes a los criterios involucrados en el análisis, ponderados por sus respectivos pesos. El modelado de algunos de los criterios que pueden ser incluidos en un análisis con oGASE se ha descrito en la Sección 4.2.4; la elección de un conjunto de ellas, así como de los valores de sus pesos correspondientes dependerá de la estrategia adoptada, de forma similar a lo realizado en mCASE.

Una vez obtenido el coeficiente para una determinada conexión se almacena en la clase *Network*, que posteriormente lo trasfiere a la clase *Optimizer*. Como este procedimiento no se ejecuta para todos los pares usuario-servicio, los índices, que indican al GLPK la ubicación de cada coeficiente, no serán consecutivos, por lo que, para cada uno de los pares involucrados en esta fase, se debe determinar su posición antes de almacenarlo. Una vez completada la estructura de los índices y los coeficientes correspondientes, se envía dicha información a la clase *Optimizer*, para que, mediante la función `lpx_set_obj_coef` del GLPK, sean introducidos en el problema de optimización.

Una vez que el GLPK ha recibido todos los datos y configuraciones correspondientes al problema, la clase *Optimizer* ejecuta las siguientes funciones del GLPK que resuelven el problema matemático de optimización:

- Se resuelve el problema, en primera instancia, con el algoritmo simplex (`lpx_simplex`)
- Se cambia el tipo de todas las variables convirtiéndolas a enteros (`lpx_set_col_kind`)
- Por último, se resuelve nuevamente el problema, de tipo entero (`lpx_integer`)

Al finalizar la resolución del problema, la clase *Optimizer* ejecuta una serie de rutinas adicionales con el fin de obtener los resultados correspondientes. Para ello, en base a la función `lpx_mip_col_val` del GLPK, se determinan los pares usuario-servicio que han resultado conectados, así como la estación base a la que han sido conectados. Esta información se envía a la clase *Network*, para que incorpore los datos correspondientes a la calidad del enlace y el precio abonado por la conexión, y posteriormente lo envíe al servidor (*Monitoring System*).

5.3.4. Módulo servidor: *Monitoring System*

Este módulo ha sido diseñado para gestionar adecuadamente los recursos computacionales necesarios a la hora de abordar las intensas tareas de procesamiento que se realizan durante la

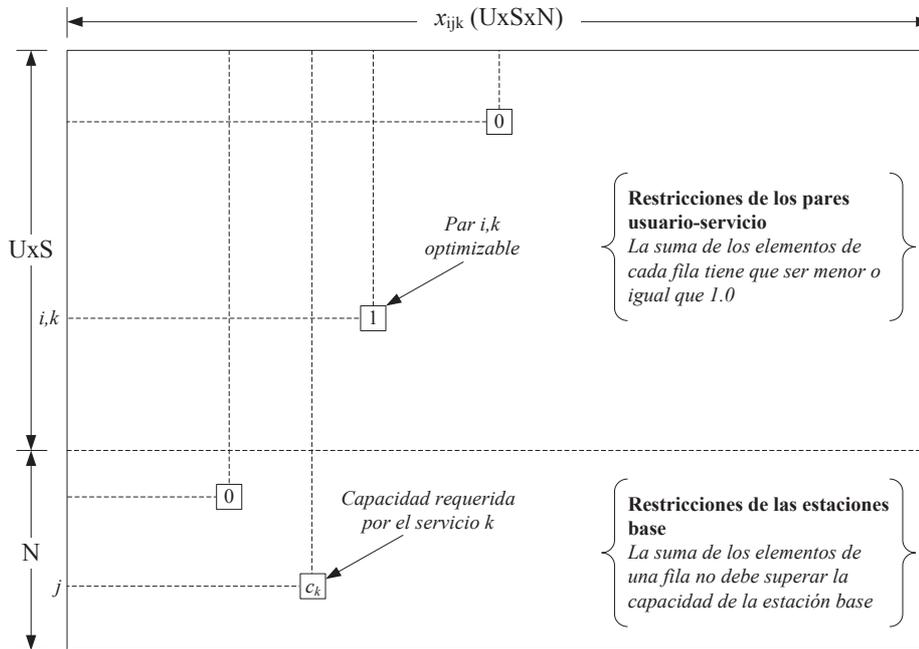


Figura 5.18: Matriz de restricciones

optimización de las fotografías. Para ello, incluye una estructura de clases que le proporciona la capacidad de gestionar varias estrategias y simulaciones a la vez, permitiendo reducir considerablemente el tiempo de simulación, en comparación con un diseño monolítico. A continuación se describen las clases principales en la que se sustenta la implementación de este módulo.

- Clase *Monitor*.** Es la principal entidad del *Monitoring System*, gestionando la fotografía que se está procesando, dentro del ámbito de la estrategia y simulación en la que se lleva a cabo. Asimismo, se encarga del intercambio de información con el *Snapshot Optimizer* durante la optimización de las fotografías. Por una parte, la clase *Network* le envía la intención de cada par usuario-servicio y espera a que el *Monitor* le devuelva el correspondiente estado, para lo cual recurre a la clase *Simulation*; por su parte, después de la optimización de cada fotografía, la clase *Network* envía al *Monitor* los pares usuario-servicio que han resultado conectados para su tratamiento. Esta clase aprovechará este intercambio de información para ir procesando la situación de la red, reduciendo la carga computacional de la generación final de estadísticas.
- Clase *Strategy*.** Realiza el almacenamiento de toda la información que va recopilando el *Monitor*, necesaria para enviarla posteriormente al *Snapshot Optimizer*, o bien para incluirla en el procesado de las estadísticas. Existirá un objeto de esta clase por cada estrategia que se esté procesando simultáneamente. Considerando que una estrategia define la estructura final que adopta un escenario de acuerdo a los objetivos del análisis que se realiza, se podría decir que cada objeto de esta clase procesa un escenario en particular.
- Clase *Simulation*.** En ella residen diversas funciones fundamentales, como las rutinas de los diagramas de estado, la actualización de estadísticas o la generación de resultados.

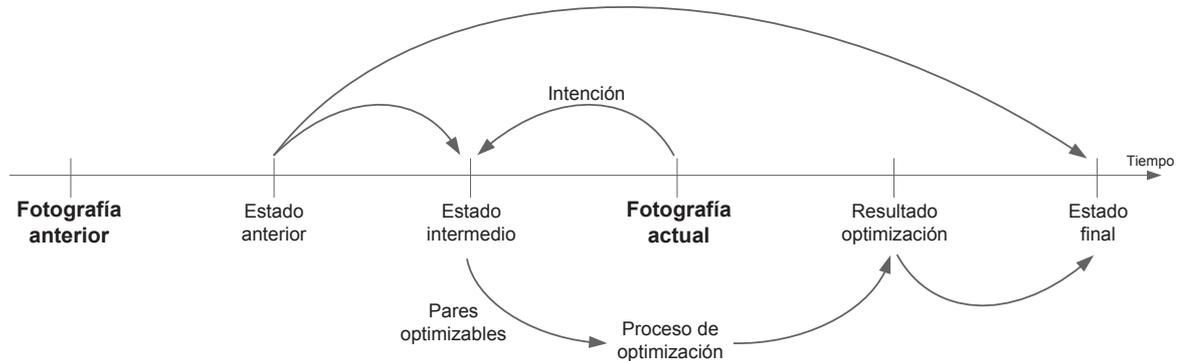


Figura 5.19: Ubicación en el tiempo de los procedimientos relacionados con la optimización

Habrá un objeto de esta clase por cada simulación que se realice de un mismo escenario, contenido, a su vez, en la clase *Strategy*.

- **Clase *Statistics*.** Procesa los resultados obtenidos por el resto de rutinas para generar los ficheros de salida con un formato que facilite su posterior tratamiento. Los datos estadísticos se almacenan en los objetos relacionados con las clases *Strategy* y *Simulation*, por lo que, para acceder a ellos, se hace uso de la clase *Monitor*.

A continuación se describen algunos de los procedimientos más relevantes implementados en las clases del servidor.

Estado de los servicios

Los estados en los que se pueden encontrar los servicios son una parte fundamental del problema de optimización, puesto que permiten modelar las diferentes posibilidades de conexión del usuario, en función de la intención que tienen en un determinado momento y del estado anterior del servicio. Aunque esto ya ha sido descrito mediante la máquina de estados descrita en la Sección 4.2.2, en este apartado se realizará una descripción más detallada, principalmente en lo relativo a los aspectos de implementación.

Su uso es fundamental en dos rutinas implementadas en la clase *Simulation*, que engloba los datos correspondientes a todas las simulaciones que se están llevando a cabo durante el análisis. Dichas rutinas se ejecutan en diferentes instantes temporales a lo largo del procesado de las fotografías, tal como se muestra en la Figura 5.19.

En primer lugar, antes de optimizar la fotografía actual, se lleva a cabo un análisis preliminar para saber qué pares usuario-servicio están en situación de ser optimizados a partir de su estado previo y de la intención actual de conectarse. Para ello, se utiliza la máquina de estados, además de un estado temporal adicional, denominado **estado intermedio** de los pares usuario-servicio, que permitirá identificar aquellos que formarán parte del problema. Posteriormente, después de ejecutar el proceso de optimización, se aplica nuevamente la máquina de estados, para obtener el **estado final** en el que se encontrarán los pares usuario-servicio en base su estado anterior y a los resultados de la resolución del problema. A continuación se describen los procedimientos que definen ambos estados.

- **Estado intermedio.** Tal como se muestra en la Figura 5.19, la función que determina este estado se ejecuta en un instante en el cual no se dispone de los resultados de la

optimización, por lo que el cálculo del estado intermedio se realiza partiendo del estado previo, almacenado de la fotografía anterior, y de la intención que tienen los pares usuario-servicio en la fotografía actual. Como un aspecto interno a la implementación de esta rutina, se ha creado un nuevo estado, de carácter temporal, denominado **optimizable**, que permite identificar los pares usuario-servicio que serán incluidos en el problema de optimización. La Figura 5.20 muestra los estados descritos en la Sección 4.2.2, junto con el nuevo estado temporal, representándose con un valor 1 ó 0 la intención de estar o no conectado, respectivamente. Se puede determinar que, independientemente del estado previo en el que se encuentren, los pares usuario-servicio que no tengan intención de conectarse, no pasarán al estado optimizable; de forma similar, aquellos que, aún teniendo la intención de conectarse, se encuentran en un estado previo rechazado o interrumpido, tampoco pasan al estado optimizable. Ambas situaciones, representadas en la figura con líneas discontinuas, determinan los pares que no formarán parte del problema de optimización, por lo que sus estados finales serán aquellos determinados por la máquina de estados. Por el contrario, aquellos pares que, estando en el estado de reposo o activo (representados con línea continua), tengan la intención de conectarse, podrán adquirir el estado temporal que los identifica para formar parte del proceso de optimización; su estado final dependerá, por tanto, del resultado de dicha optimización.

- **Estado final.** Habiendo identificado, en la rutina anterior, los pares que son optimizables, la clase *Monitor* comunica dicha información a la clase *Network*, para que ésta lo incluya dentro del proceso de optimización de la fotografía actual. Una vez finalizada las rutinas de optimización, el resultado de las mismas se envían a la clase *Simulation*, a través del *Monitor*, para que se establezca el estado definitivo de todos los pares usuario-servicio que formaron parte del problema, de acuerdo al estado previo y al resultado de la optimización, tal como se muestra en la Figura 5.21. Los números sobre las líneas de transición entre estados representan la intención y el resultado de la optimización, respectivamente. Como se puede observar, todas las situaciones representan la intención de conectarse, siendo éste requisito indispensable para formar parte del problema. Por su parte, el resultado de la optimización puede ser 1 ó 0, dependiendo de si el par ha logrado establecer una conexión o no. Si el estado previo era de reposo y se lleva a cabo la conexión, pasará al estado de activo; en caso contrario será rechazado. De forma similar, si se encontraba en estado activo y continua conectado, se mantendrá en ese estado y, en caso contrario, pasará al estado de interrumpido.

Sistema de estadísticas

Todas las operaciones que se realizan hasta finalizar las simulaciones correspondientes a las estrategias definidas para un determinado análisis, carecerían de valor si no existiese un sistema de estadísticas que procese, adecuadamente, todos los sucesos acontecidos en la red, en virtud de los resultados generados por la herramienta GLPK. Resulta, por tanto, imprescindible tratar apropiadamente los resultados, con el fin de interpretar el grado de optimización que se ha producido en la red a raíz de la estrategia elegida. Tal como se ha descrito durante el modelado del *Monitoring System* (Sección 4.2.1), el sistema de estadísticas se divide en tres módulos, en los cuales se implementan las estructuras para almacenar los datos necesarios para llevar a cabo su tarea. A continuación se describe la implementación de cada una de ellas.

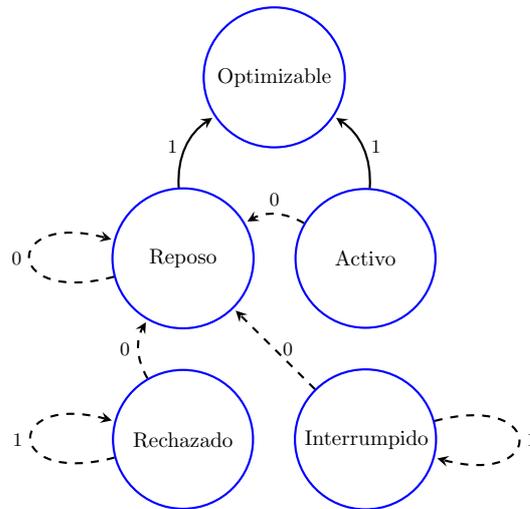


Figura 5.20: Máquina de estados intermedio para un par usuario-servicio. Las líneas discontinuas representan las transiciones de los pares que no serán incluidos en la optimización. Las líneas continuas corresponden a los pares optimizables

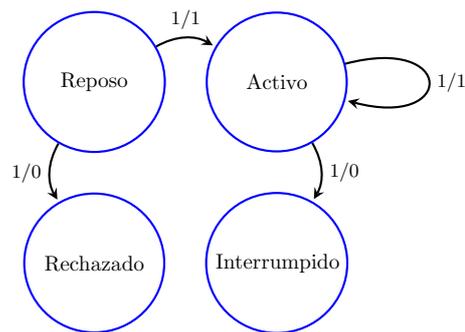


Figura 5.21: Máquina de estados finales para un par usuario-servicio optimizable

1. **Servicios en curso.** En esta estructura se almacenan datos fijos (identificadores de usuario y de servicio, y el estado en el que se encuentra la tupla), e información variable, que cambia de valor en el momento en el que se tenga una llamada activa a lo largo de una o más fotografías.

- **Tipo de servicio:** Identificador del tipo de servicio al que pertenecen los datos. Será utilizado para la clasificación posterior de la información recopilada, en función del tipo de servicio.
- **Tipo de usuario:** Identificador del tipo de usuario, pudiendo ser *consumer* o *business*. Serán de utilidad para una clasificación posterior, por tipo de usuario, de las estadísticas generadas.
- **Duración de la llamada:** Contador que mantiene la duración, en número de fotografías, del servicio en curso, y que se actualiza conforme transcurre la llamada mientras que no sea interrumpida.

- **Calidad global:** Cada vez que la tupla en cuestión se conecta satisfactoriamente este campo se actualiza con el valor de calidad que haya obtenido. Se utilizará posteriormente para calcular la calidad media, a partir de la duración total de la llamada.
 - **Trasposos:** Este contador se incrementa cuando, producto del resultado de la optimización, el identificador de la estación base al cual el par ha resultado conectado no coincide con el que estaba conectado anteriormente.
 - **Operador Preferido:** Cuenta las fotografías en las que un par se ha conectado a estaciones base de su operador preferido durante una llamada.
 - **RAT preferida:** Se incrementará en las fotografías en las que la tupla usuario-servicio se conecte usando su tecnología de acceso preferida.
 - **Precio global:** Suma de todas las cantidades pagadas por el par a las estaciones base, siempre dentro de la llamada en curso.
2. **Estaciones base.** La estructura de almacenamiento en la que se apoyan las estadísticas relativas a la estaciones base es un vector en el que cada índice se corresponde con el identificador de la estación base. Los campos de la estructura, y su utilización, se describen seguidamente.
- **Tipo de RAT:** Tipo de tecnología de acceso de la que dispone la estación base. Se utilizará al generar los ficheros de salida, para clasificar las estadísticas correspondientes.
 - **Operador:** Operador propietario de la estación base.
 - **Capacidad:** La capacidad será un dato básico para obtener el porcentaje de ocupación en función de la carga.
 - **Vector Carga:** Tendrá un elemento por cada fotografía de simulación vigente. Almacena la carga cursada por la estación base en cuestión.
 - **Vector Ganancias:** Contiene el importe total recaudado en cada fotografía de la simulación.
3. **Servicios Finalizados.** La estructura que almacena los datos estadísticos de los servicios finalizados, está indexada de manera que los mismos se clasifican en función de los tipos de usuario y servicio, teniendo así un formato válido para generar fácilmente los ficheros de salida. Para cada tipo de usuario existirá una estructura por cada servicio, cuyos campos se muestran a continuación:
- **Tipo de servicio:** Identificador del tipo de servicio al que se hace referencia en los campos restantes.
 - **Capacidad:** Cantidad de recursos que requiere el servicio para ser cursado correctamente.
 - **Optimizables:** Contador del número de servicios que serán incluidos en el problema para un tipo de usuario y servicio en concreto.
 - **Dropped:** Contador del número de servicios interrumpidos mientras estaban en curso, para el tipo de usuario y servicio a los que pertenece la estructura.
 - **Rejected:** Contador de número de servicios rechazados.

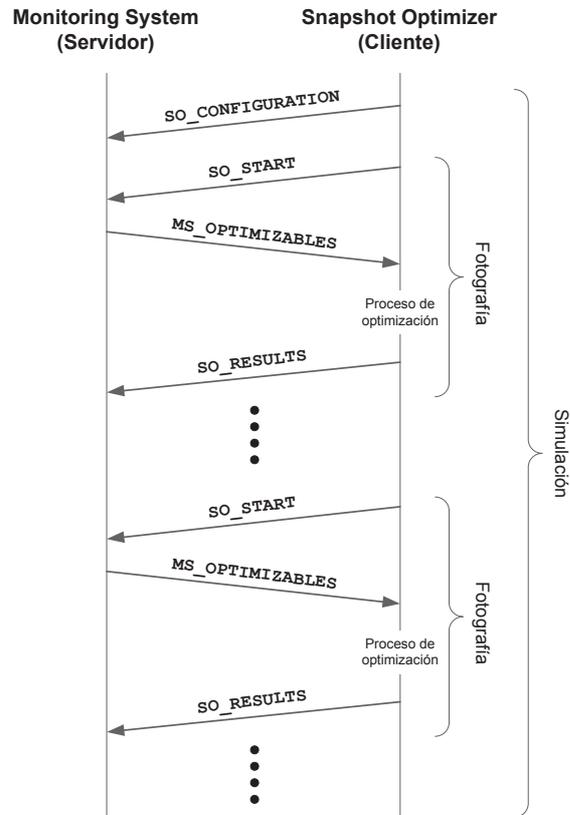


Figura 5.22: Protocolo de comunicación entre cliente y servidor

- **Success:** Almacena el número de llamadas que han terminado de manera exitosa.
- **Vector de información sobre llamadas finalizadas con éxito:** Para todas aquellas llamadas que finalizan satisfactoriamente se crea una nueva estructura que irá contenida en un vector, cuyo tamaño aumentará a medida que se produzca un nuevo evento de este tipo.

5.3.5. Protocolo de comunicación

El protocolo diseñado permite el intercambio de información entre el servidor y las instancias del cliente, que pueden ser ejecutadas en diversas máquinas. Hace uso de los servicios de TCP, para asegurar la entrega en orden en el destino, conforme al diagrama mostrado en la Figura 5.22. Cabe recalcar que el intercambio de paquetes se realiza únicamente entre las clases *Monitor* y *Network*, correspondientes al servidor y cliente, respectivamente; las demás clases hacen uso de ellas para transmitir/solicitar la información que requieran. Como se puede observar, el *Monitoring System*, en su papel de servidor, recibirá diferentes paquetes TCP estructurados conforme lo requiera la información que transporten; es por ello que resulta necesario identificar mediante una cabecera los diferentes tipos de paquetes, para que sean tratados adecuadamente. A continuación se describe cada uno de ellos.

1. **Paquete de configuración (SO_CONFIGURATION).** Este paquete es enviado por el *Snapshot Optimizer* al inicio de cada proceso de simulación para proporcionar al *Monitoring System* toda la información correspondiente a la configuración de la red, que será

utilizada en las diversas rutinas implementadas en el servidor, como, por ejemplo, en el cálculo de estadísticas. Los datos que se incluyen en este paquete son los siguientes:

- Identificadores globales del escenario y de la estrategia, que permiten distinguir las diferentes instancias del cliente que se estén ejecutando.
 - Número de fotografías y total de simulaciones, utilizado para controlar la finalización de la simulación, una vez se hayan procesado todas las fotografías correspondientes a la misma.
 - Número de usuarios, servicios y estaciones base.
 - Información sobre los diferentes tipos de servicios.
 - Información de los tipos de RAT.
 - Información sobre los tipos de usuario.
 - Operador y tipo de cada uno de los usuarios incluidos en el escenario.
 - Operador y RAT para todas las estaciones base desplegadas.
2. **Paquete de intenciones (SO_START)**. Con este paquete el cliente indica al servidor que se ha iniciado el procesado de una nueva fotografía de una etapa de simulación concreta. Debido a ello, este paquete incluye la intención que tiene cada par usuario-servicio correspondiente a dicha fotografía.
 3. **Paquete de pares optimizables (MS_OPTIMIZABLES)**. Recibidas las intenciones de los pares usuario-servicio, el servidor cuenta con toda la información para determinar el estado intermedio de todas las tuplas, y, en base a ello, detecta aquellos que son susceptibles a ser optimizadas. Dicha información es enviada al cliente mediante este paquete, incluyéndose, además, la información correspondiente a la estación base y la tarifa abonada por dichas conexiones en la fotografía anterior.
 4. **Paquete de resultados (SO_RESULTS)**. Contiene la información correspondiente a los resultados obtenidos tras la ejecución de la librería GLPK. Para cada par usuario-servicio, se suministrará el identificador de la estación base, en caso de haber resultado conectado, así como la medida de la calidad del enlace y el precio abonado por la conexión. Este es el último paquete que se envía en el marco de una fotografía en concreto, por lo que implícitamente indica al servidor el fin del procesado de la misma.

6

Capítulo

Análisis de Escenarios de Selección de Acceso

Realizada la especificación de la metodología de análisis llevada a cabo en la Tesis, así como su respectiva implementación en sendas herramientas de simulación, en este apartado se describirá su aplicación sobre diversos escenarios que pretenden reflejar las principales características de las redes inalámbricas heterogéneas. Cada escenario planteará diversos objetivos en base a los casos de uso que se definen para ese fin, centrado en todo momento en proporcionar la mejor alternativa de acceso para el usuario. En este sentido, primero se definen dos escenarios (MC-01 y MC-02), que hacen uso únicamente de la metodología planteada por mCASE. El primero de ellos (MC-01), tiene como objetivo principal demostrar la flexibilidad y capacidad de la herramienta mCASE, planteando un escenario altamente heterogéneo, aunque sin definir un fin específico. El segundo escenario (MC-02), busca un balanceo de la carga en base a políticas dinámicas de precio en un entorno multi-operador. Para lograr ese objetivo, hace uso de un escenario más simple, evitando así que la complejidad en el despliegue impida ver con claridad el resultado buscado.

Por otra parte, el segundo conjunto de escenarios hacen uso de la herramienta oGASE. Al igual que con mCASE, al emplear únicamente dicha herramienta se pretende mostrar el impacto que puede tener las técnicas de optimización en los procesos de selección de acceso. De igual forma, se definen dos escenarios: uno genérico, con una gran heterogeneidad, y otro con un fin más específico, pero de menor complejidad. A diferencia de los escenarios de mCASE, se introducen nuevos criterios, para estudiar otros casos de uso que permitan demostrar el alcance que puede tener la metodología oGASE.

Tal como se comentó anteriormente, aunque cada metodología se puede utilizar de manera independiente, ambas fueron concebidas para ser complementarias. Debido a ello, se plantea un escenario final, mediante el que se busca la mejor alternativa de acceso para el usuario en base al enfoque local que presenta mCASE y, a su vez, se analiza cuán cerca se encuentra el rendimiento obtenido del valor óptimo proporcionado mediante el enfoque global que ofrece oGASE. Este estudio permitirá analizar con más detalle el impacto de cada criterio, y sus respectivos parámetros, dando la posibilidad de tomar decisiones acerca de los criterios a ser considerados dentro de la función de utilidad, así como de los principios de diseño adoptados en cada una de ellas, permitiendo a la herramienta mCASE proporcionar resultados lo más cerca posible del rendimiento óptimo marcado por oGASE como referencia.

Tabla 6.1: Características de las tecnologías empleadas en el escenario MC-01

Operador id	RAT id	Cobertura (<i>m</i>)	Capacidad (<i>TU</i>)	Número AE	Tecnología emulada
A	0	80	5	20	WLAN-B
A	1	60	8	30	WLAN-A
B	2	600	20	2	GSM

6.1. Escenario MC-01: Entorno genérico multi-RAT, multi-operador, y multi-terminal

El amplio número de parámetros que pueden ser configurados en el simulador mCASE le permite mimetizar una gran variedad de escenarios de red sobre los que analizar diversas estrategias de selección de acceso. Con el objetivo de mostrar la validez de la herramienta, así como la flexibilidad que ofrece, se propone el uso de un escenario heterogéneo no solo teniendo en cuenta las tecnologías de red involucradas, sino también la presencia de varios operadores y diversos tipos de terminales. Todo este conjunto de elementos heterogéneos se armonizan sobre dos configuraciones diferentes, que se definen en función del tipo de terminal utilizado por el usuario. Se proporciona al usuario la posibilidad de utilizar varios tipos de servicios de forma simultánea y, si es necesario, a través de diferentes AE. El algoritmo de selección de acceso se basa en 4 criterios, cuyas combinaciones permiten definir un número relevante de estrategias, con el objetivo principal de evaluar el impacto que cada criterio tiene sobre el escenario analizado.

6.1.1. Descripción del escenario

El escenario utilizará tres tipos de tecnologías de red, cuyas características se resumen en la Tabla 6.1. La primera emula una tecnología de características similares a las comunicaciones celulares tradicionales (en este caso, GSM), pues tiene una cobertura sensiblemente superior y cuenta, además, con una mayor capacidad. Las otras dos tecnologías se asemejan más a puntos de acceso IEEE 802.11b e IEEE 802.11a, con un alcance y capacidad claramente inferiores. El modelado de la capacidad para ambas tecnologías se basa en la abstracción descrita en la Sección 5.2.1, utilizando unidades de tráfico discretas denominadas TU. También se considera que en el escenario coexisten dos operadores; sobre un entorno dominado por un operador incumbente (B), que gestiona las estaciones base con tecnología celular, aparece un nuevo operador (A) con una tecnología de acceso menos convencional, basada en redes de área local, pero agresiva en el número de puntos de acceso.

Se considera para el análisis un área de $1000 \times 1000 \text{ m}^2$, en la que los elementos de acceso se despliegan sin una planificación previa, esto es de forma aleatoria, aunque limitando la distancia entre ellos (siempre que sean del mismo operador y de la misma tecnología). La Figura 6.1 muestra el despliegue concreto que finalmente fue empleado en el análisis, en el que las 2 estaciones base GSM del operador B cubren una gran parte del área bajo análisis, sin existir demasiado solapamiento entre ellas. El área cubierta por el operador A es sensiblemente menor, pero permite dar cobertura a una zona significativa, no cubierta por el operador incumbente, tal como se observa en la esquina superior izquierda del escenario.

Se despliegan 200 usuarios, y se asume que el 60 % son clientes del operador B, mientras que el resto lo son del menos tradicional (A). Se definen tres tipos de terminales: uno básico

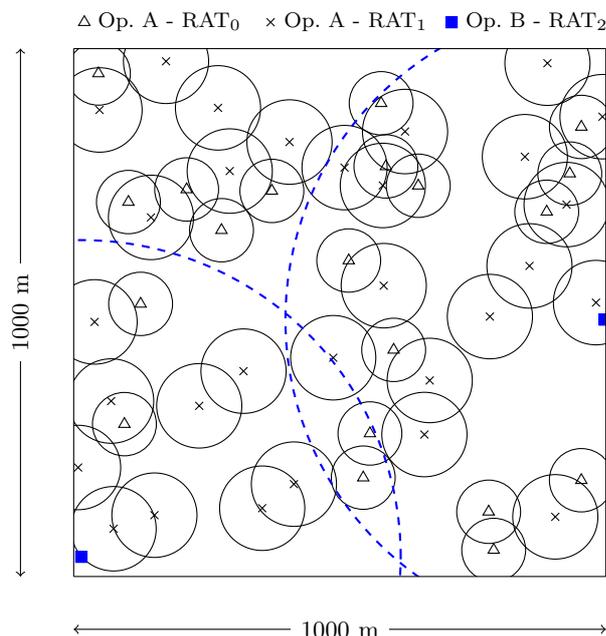


Figura 6.1: Despliegue de red del escenario MC-01

Tabla 6.2: Características de los servicios utilizados en el escenario MC-01

Servicio id	T_{ia} (s)	T_s (s)	Capacidad (TUs)	Tipo servicio
0	120	60	1	Datos
1	120	180	1	Voz
2	200	180	3	Video

que incorpora únicamente como tecnología de comunicación inalámbrica una interfaz GSM; otro de tipo medio, con dos interfaces de red inalámbrica, una GSM y otra WLAN-A; y finalmente una de tipo avanzado, que incorpora las tres tecnologías involucradas en el análisis. La asignación de un tipo de terminal específico a cada usuario se hace en función de probabilidades; en este caso se especificaron 0.30, 0.40 y 0.30 para la asignación de terminales del tipo básico, medio y avanzado, respectivamente. Se definen también dos tipos de usuarios, uno doméstico y otro profesional, en función de los tipos de servicios que emplean. Para ello se han definido tres servicios diferentes, cuyas características se resumen en la Tabla 6.2. En base a dichos servicios el usuario doméstico, que representa el 70% del total, utiliza los servicios de voz y datos, mientras que el resto de usuarios (profesionales) emplean, además de voz y datos, el servicio de video. Los usuarios inicialmente se sitúan aleatoriamente en el área bajo análisis y, posteriormente, se mueven libremente según el modelo *Random Waypoint*, de acuerdo a las características de movimiento que se resumen en la Tabla 6.3.

Del conjunto de funciones de utilidad de mCASE descritas en la Sección 4.1.4, se han utilizado, para el presente análisis, las correspondientes a los siguientes criterios: operador preferido (Δ_{ij}), traspaso (B_{ij}), calidad del enlace (E_{ij}), y carga (Γ_{ij}). En base a ellos, se define la función de utilidad agregada (Φ_{ij}) que los combina linealmente, permitiendo establecer una clasificación de los AE disponibles, tal como se describe en la Sección 4.1.3.

Tabla 6.3: Características del modelo Random WayPoint usado en el escenario MC-01

Característica	Valor
Velocidad	$\mathbb{U}[4, 6]$ m/s
Tiempo de movimiento	$\mathbb{U}[100, 120]$ s
Tiempo de pausa	$\mathbb{U}[20, 40]$ s
Estrategia en los límites	Reflexión

Tabla 6.4: Estrategias de selección de acceso del escenario MC-01

Parámetro	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
ω_{po}	0.25	1	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0
ω_{ho}	0.25	0	1	0	0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0
ω_{lq}	0.25	0	0	1	0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5
ω_{lo}	0.25	0	0	0	1	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.5

$$\Phi_{ij} = \omega_{po} \cdot \Delta_{ij} + \omega_{ho} \cdot B_{ij} + \omega_{lq} \cdot E_{ij} + \omega_{lo} \cdot \Gamma_{ij} \quad (6.1)$$

Para que la función de utilidad agregada sea lo más flexible posible, se modula cada uno de los criterios por un peso; así, ω_{po} promueve el uso de un AE perteneciente al operador preferido; ω_{ho} se utiliza para dar mayor peso a la predisposición a minimizar la necesidad de cambiar de AE; ω_{lq} potencia el uso del AE con mayor calidad del enlace radio; y, finalmente, ω_{lo} busca balancear la carga de los AE del escenario, penalizando el acceso en los AE más congestionados. Para el presente análisis se asume que los parámetros σ y ρ , correspondientes a los criterios de traspaso y operador preferido, son iguales a 1.0; por lo que se puede comprobar que todas las funciones de utilidad que se están utilizando se encuentran acotadas entre [0,1]. Así, si se establece que la suma de los cuatro pesos sea igual a la unidad, $\omega_{po} + \omega_{ho} + \omega_{lq} + \omega_{lo} = 1$, se puede acotar la función de utilidad agregada en el mismo intervalo.

Una vez presentado el escenario, se proponen las diferentes estrategias de selección de acceso que se utilizarán durante el análisis. Dichas estrategias se basan en la asignación de diferentes valores a los pesos de cada criterio, tal como se muestra en la Tabla 6.4. Cada estrategia otorga una determinada prioridad a uno o varios de los criterios en función de sus objetivos. En este sentido, la estrategia **A** proporciona el mismo peso a todos, con el objeto de analizar el efecto de igualar los pesos dentro de la función de utilidad agregada. Las estrategias **B**, **C**, **D** y **E** se enfocan (cada una de ellas) en un único criterio, con la idea de estudiar el grado de influencia que cada uno de ellos tiene, de forma individual, en el comportamiento del sistema. Finalmente, las estrategias **F**, **G**, **H**, **I**, **J** y **K** favorecen simultáneamente a dos criterios, con la finalidad de evaluar la influencia de la combinación de ambos en la selección de acceso.

6.1.2. Resultados de la simulación

A continuación se describen los resultados obtenidos al emplear las 11 estrategias de selección de acceso que se han presentado previamente, aplicadas sobre dos configuraciones complementarias del mismo escenario. En la primera, cuyos resultados se muestran en la Figura 6.2, se asigna a cada usuario uno de los tres tipos de terminales en base a la distribución

detallada previamente, mientras que en el segundo caso (Figura 6.3) todos los usuarios emplean el terminal avanzado. Por otra parte, la simulación tiene una duración de 2000 segundos, realizándose 100 ejecuciones independientes para cada estrategia, promediando el resultado final, con el fin de asegurar la validez estadística de los resultados.

Las figuras 6.2a y 6.2b muestran la probabilidad de que un servicio finalice con éxito o que sea rechazado desde un inicio, respectivamente. Como se puede observar, la suma de ambas probabilidades no necesariamente es igual a 1.0, ya que pueden existir algunas llamadas en curso que han tenido que ser interrumpidas (*dropped services*) debido a la escasez de recursos durante un proceso de traspaso. En la Figura 6.2a se observa que las diferentes estrategias no tienen una gran influencia sobre la probabilidad de que un servicio termine apropiadamente, pero sí confirma el hecho de que aquellos servicios de baja capacidad muestran una mayor probabilidad de finalizar con éxito (Servicio 0 - datos) en comparación con los servicios más exigentes (Servicio 2 - vídeo). Por otra parte, de los resultados de la Figura 6.2b, se puede inferir que existe una cierta influencia de las estrategias sobre la probabilidad de rechazo. Se puede observar que las estrategias **E**, **J** y **K** consiguen reducirla, y eso es debido a que en esos casos se otorga un mayor peso al criterio de balanceo de carga (ω_{lo}), con lo que se consigue mantener una mayor capacidad disponible en los AE del escenario. Siguiendo este razonamiento, la estrategia **H** también tendría que mostrar un comportamiento similar, pero en este caso dicha estrategia se ve penalizada por la presencia del criterio de operador preferido (ω_{po}), que influye negativamente en la probabilidad de rechazo, ya que existe un mayor número de usuarios que pertenecen al operador incumbente, cuyas estaciones base, como se podrá ver más adelante, se saturan rápidamente.

La Figura 6.2c, que representa el número medio de traspasos por servicio, pone de manifiesto una mayor influencia de las diferentes estrategias en esta figura de mérito. Es necesario aclarar que para esta métrica sólo se han tenido en cuenta los servicios finalizados correctamente. Se puede observar que las estrategias **C**, **F**, e **I** muestran un menor número medio de traspasos, debido a que en ellas se da una mayor importancia al criterio de traspaso. Sin embargo la estrategia **J** no manifiesta el mismo comportamiento, ya que el efecto combinado con el criterio de carga hace que el número medio de traspasos se incremente ligeramente. Finalmente, en la Figura 6.2d se muestra la carga relativa que tienen los AE (para las diversas RAT). Destaca la saturación que presentan los AE del operador incumbente (RAT₂ - GSM), que llegan a soportar más del 90 % de carga relativa para todas las estrategias. Se alcanza esta situación debido a que, por una parte, la distribución del mercado en el escenario analizado asigna un 60 % de usuarios al operador incumbente, que gestiona además los AE con tecnología de mayor cobertura y, por otra parte, todos los usuarios tienen la capacidad de conectarse al operador incumbente, ya que todos los terminales poseen interfaz GSM. Por otro lado, se puede observar que la carga relativa en las RAT del operador novel es bastante baja, inferior al 10 %, debido principalmente a la poca cobertura que ofrecen, en su conjunto, todos los AE que pertenecen a este operador, a pesar de su mayor número. Esta circunstancia se ve acentuada por el hecho de que no todos los usuarios tienen la capacidad de conectarse a los AE del operador novel, ya que podrían disponer únicamente de un terminal de tipo básico, el cual solo tiene interfaz GSM. Enfocando el análisis en las tecnologías del operador novel, en particular en el RAT₀, se puede observar que para las estrategias **E** y **K**, el porcentaje de carga relativa llega al 10 %, ya que en dichas estrategias se da un mayor peso al balanceo de carga entre los AE. Las estrategias **H** y **J** deberían seguir esta tendencia pero se ven afectadas de forma negativa por el peso combinado de los criterios de operador preferido y traspaso, respectivamente.

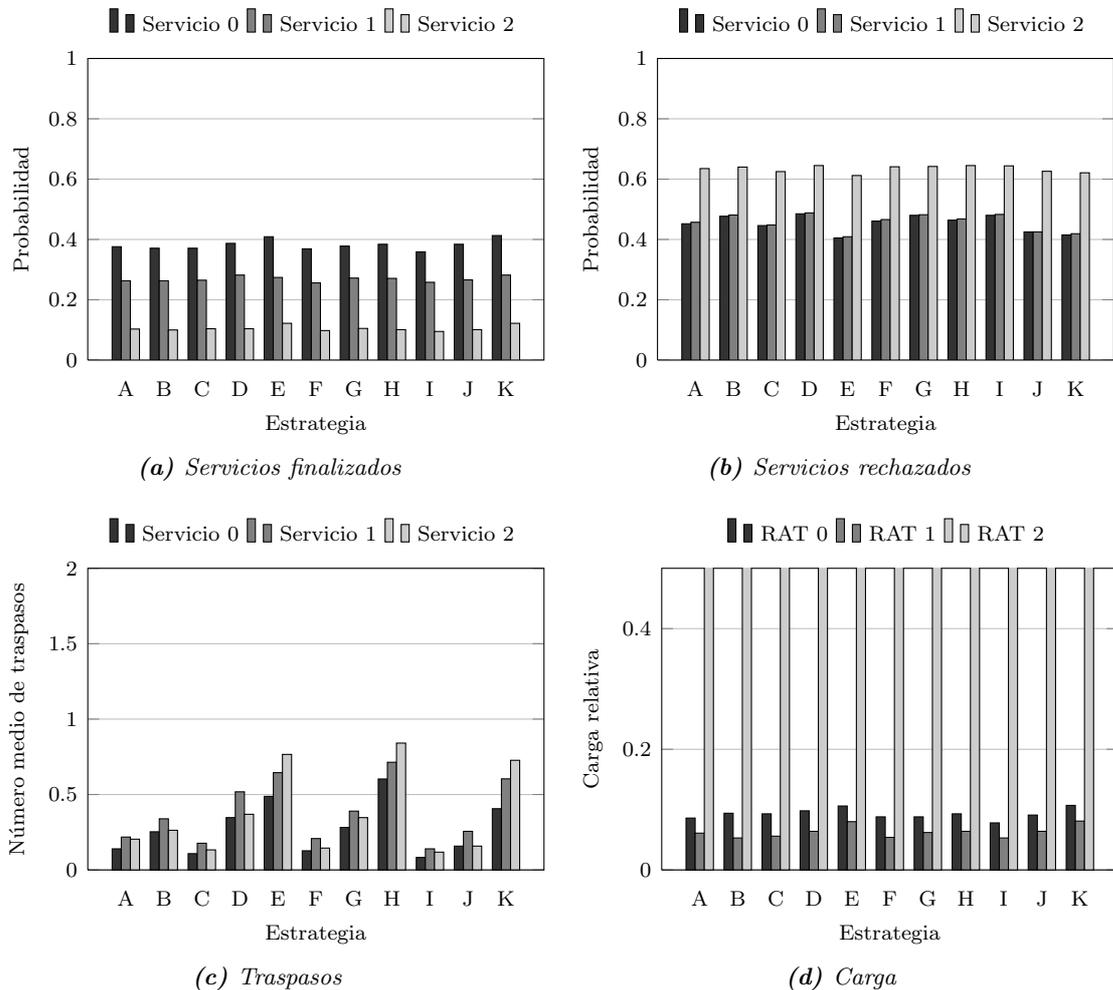


Figura 6.2: Prestaciones de las estrategias de acceso con tres tipos de terminales

La Figura 6.3 pone de manifiesto el impacto que produce el cambio de un único parámetro en la configuración del escenario analizado. El uso de un tipo de terminal que incorpora interfaces de comunicación para cada una de las tecnologías presentes en el escenario (terminal avanzado), hace que los resultados en las métricas equivalentes de la Figura 6.2 se vean notoriamente afectadas. La probabilidad de que un servicio finalice con éxito se incrementa en aproximadamente un 10 % para todos los tipos de servicio, tal como se muestra en la Figura 6.3a. De forma similar, los servicios rechazados (Figura 6.3b) se reducen aproximadamente un 35 % en todas las estrategias, debido a que en este caso se tiene un mayor conjunto de alternativas de acceso con el terminal avanzado. En la Figura 6.3c se puede observar que el número medio de traspasos aumenta notablemente en las estrategias **E**, **H** y **K**, debido a que en ellas se otorga una mayor importancia a los recursos disponibles de los AE (ω_{lo}), incrementando la probabilidad de que un usuario pueda pasar de un AE a otro, lo que se junta al hecho de que se dispone de un mayor número de alternativas de acceso en el terminal. Esta misma tendencia debería reflejarse en la estrategia **J**, pero el efecto combinado con el peso del criterio de traspaso hace que el rendimiento, para este parámetro, sea peor. Finalmente,

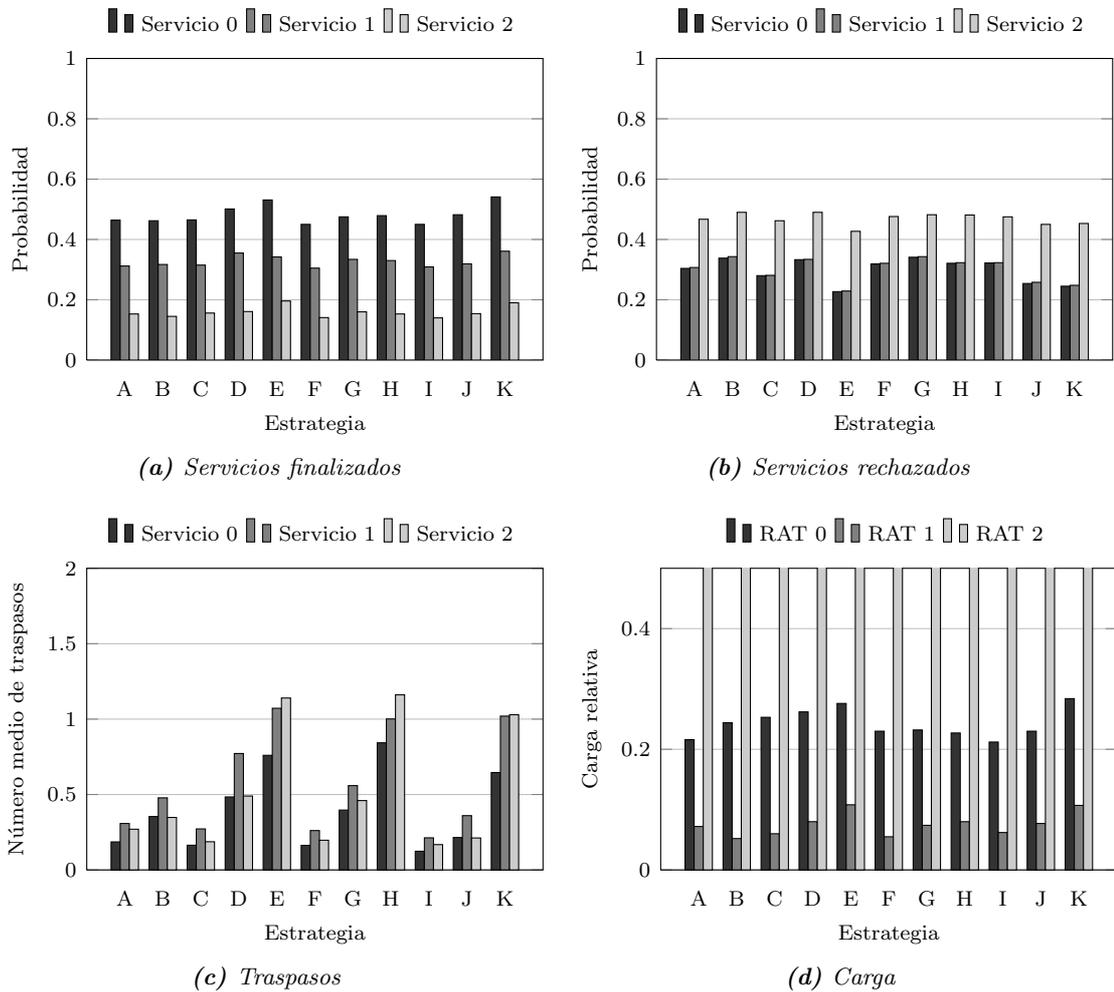


Figura 6.3: Prestaciones de las estrategias de acceso solo con tipo de terminal avanzado

en la Figura 6.3d se puede observar, para el caso del RAT₀, que el porcentaje de ocupación de los AE ha subido notablemente, siendo menor el incremento para el caso del RAT₁, ya que su cobertura es inferior. Cabe destacar que, al igual de lo que ocurría en los resultados presentados en la Figura 6.2, la carga relativa de los AE del operador incumbente es siempre superior al 90%, favorecidos por garantizar una cobertura prácticamente global.

6.1.3. Discusión

El escenario analizado, que incorpora varios operadores, cada uno de ellos gestionando diversos AE con diferentes tipos de RAT, y con usuarios que hacen uso de distintos tipos de terminal, se puede considerar como un entorno heterogéneo típico. En este sentido, la herramienta mCASE pone de manifiesto su flexibilidad y potencial, al mimetizar de manera sencilla escenarios de este tipo, e incluso con requerimientos y características adicionales. Se han analizado un número elevado de estrategias de selección de acceso, mostrándose el impacto que tienen los pesos de cada criterio sobre los resultados. Se ha visto, por ejemplo, que el efecto combinado de varios pesos da lugar, en algunos casos, a tendencias diferentes en

los resultados, dependiendo del criterio al cual pertenezcan. En todo caso se deben establecer grados de compromiso entre los diferentes criterios de mérito a la hora de decantarse por uno u otro acceso. Esto deriva en la necesidad de elegir los pesos de manera adecuada para conseguir los resultados más apropiados, acorde con los objetivos que se pretenden alcanzar. También queda pendiente por analizar el efecto que produce el parámetro del criterio de traspaso (σ) a la hora de establecer estrategias en base al uso combinado con otros parámetros, siendo éste uno de los propósitos del análisis que se presenta en la Sección 6.2.

6.2. Escenario MC-02: Balanceo de carga basado en el precio en un entorno multi-operador

A diferencia del escenario MC-01, que presentaba un enfoque más genérico, en este caso se definen objetivos específicos que alcanzar. En este sentido, se analizará la posibilidad de que los operadores hagan uso de sus estrategias de precios para equilibrar la carga entre los AE desplegados. Teniendo en cuenta que en el escenario están presentes varios operadores, se asume que los usuarios deben poder acceder a los servicios sin estar limitados por barreras tecnológicas o administrativas. Por parte de la red, se asume que las estaciones base tienen la capacidad de modular el precio ofrecido de acuerdo a la carga instantánea que soportan, para que puedan atraer o disuadir a los usuarios en función de su capacidad disponible. Cabe destacar que también se asume que los usuarios no mantienen contrato con ninguno de los operadores involucrados en el análisis y, por tanto, no muestran preferencia hacia ninguno de ellos. Como tal, se puede describir el escenario como un mercado abierto, donde los clientes seleccionan la alternativa de acceso que ofrece la mejor utilidad.

6.2.1. Descripción del escenario

Para establecer el precio de los recursos de los AE, se propone una función lineal a tramos, tal como se muestra en la Figura 6.4. En este sentido, cada uno de los AE utilizarían dos umbrales. Cuando la capacidad disponible se encuentre por debajo del valor Lth_{lower} , el AE fija su precio al máximo ($p_{m\acute{a}x}$), disuadiendo al usuario a conectarse a una estación base cargada. Si la capacidad disponible está por encima del valor Lth_{upper} , la estación base fija su precio a un valor mínimo aceptable, $p_{m\acute{i}n}$ ($p_{m\acute{i}n} = \psi \cdot p_{m\acute{a}x}$, con $\psi \in [0, 1]$), ya que el objetivo sería convencer al usuario de que se conectase con una estación base con baja carga. Entre ambos umbrales, se utiliza una función lineal decreciente, por medio de la cual el precio se modula en función de la carga que actualmente soporta el AE. En este sentido, si la carga relativa de una determinada estación base j es θ_j (es decir, su capacidad relativa disponible es $1 - \theta_j$), fijaría un precio p_j , tal como se puede ver en la Figura 6.4.

En el marco de este escenario, del conjunto de funciones de utilidad presentadas en la Sección 4.1.4, se utilizarán las correspondientes a los siguientes criterios: precio (A_{ij}), traspaso (B_{ij}), y carga (Γ_{ij}). Cabe resaltar la diferencia entre la función de utilidad del criterio de precio (Figura 4.5) y la función del precio de la estación base (Figura 6.4); ambas son complementarias, pero cumplen funciones diferentes. Una vez que la estación base fija su precio en base a su carga actual, se utiliza dicho valor para determinar la utilidad que percibe un usuario de acuerdo a la función que modela el criterio de precio. En general, considerando los criterios seleccionados para este escenario, la función de utilidad agregada (Φ_{ij}), definida de manera genérica en la Ecuación (4.1), puede expresarse como sigue:

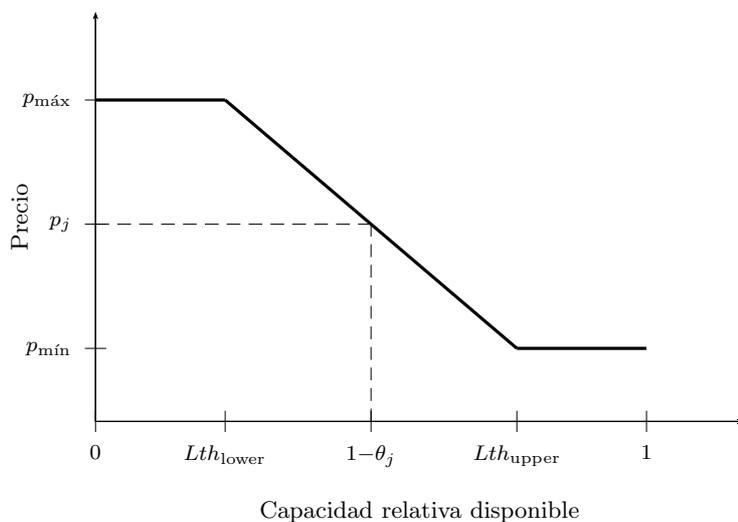


Figura 6.4: Precio de la estación base en función de la carga actual

Tabla 6.5: Estrategias de selección de acceso del escenario MC-02

Estrategia	ω_{pr}	ω_{ho}	ω_{lo}
Price Based Load Balancing (PBLB)	1.0	0.0	0.0
Enhanced PBLB (ePBLB)	0.5	0.5	0.0
Load Balancing (LB)	0.0	0.0	1.0
Enhanced LB (eLB)	0.0	0.5	0.5

$$\Phi_{ij} = \omega_{pr} \cdot A_{ij} + \omega_{ho} \cdot B_{ij} + \omega_{lo} \cdot \Gamma_{ij} \quad (6.2)$$

donde ω_{pr} , ω_{ho} , y ω_{lo} son los pesos que se asignan a los criterios de precio, traspaso y carga, respectivamente, y se fijan de tal forma que su suma sea igual a 1.0. Estos pesos permiten modular las estrategias de selección de acceso que se muestran en la Tabla 6.5; todas tienen como objetivo final conseguir un cierto balanceo de la carga, pero utilizando enfoques diferentes. La estrategia *Load Balancing* (LB) utiliza el criterio que, de forma nativa, favorece el balanceo de la carga, cuyos resultados se comparan con los que ofrece la estrategia *Price Based Load Balancing* (PBLB), que se basa en el precio para lograr el mismo objetivo. Las dos versiones mejoradas (eLB y ePBLB) se proponen con el fin de estudiar el compromiso entre la reducción del número de traspasos y la búsqueda de un mejor balanceo de carga. Con ese objetivo, ambas estrategias combinan dos criterios, cuya relación quedará definida por los pesos que se asignen a cada criterio. En las siguientes secciones se estudia cuáles son los pesos adecuados para establecer una relación de equilibrio entre los dos criterios, de tal forma que ninguno de ellos tenga una mayor relevancia sobre el otro.

Relación entre los criterios de precio y traspaso

Asumiendo que el operador desea establecer una estrategia basada en los criterios de precio y traspaso, se calcula el valor de σ (Ecuación (4.3)), para evitar que alguno de los

dos tenga una influencia predominante dentro de la utilidad global. Para ello, se fijan los pesos correspondientes al mismo valor ω , quedando la Ecuación (6.2) como se muestra a continuación:

$$\Phi_i = \omega \cdot A_{ij} + \omega \cdot B_{ij} \quad (6.3)$$

Se considera el supuesto en el que un usuario se conecta a un determinado AE_a , pagando un precio P_a , y se analiza la posibilidad de cambiar a otro AE_b , que ofrece un precio más barato (P_b). Comparando ambos precios, se determina que el precio del segundo AE presenta una reducción de χ ($100 \cdot \chi$ %) con respecto al ofrecido por el acceso actual, esto es $P_b = (1 - \chi) \cdot P_a$. Evaluando la Ecuación (6.3) para AE_a , se obtiene:

$$\Phi_a = \omega \cdot (-\log(P_a)) + \omega \cdot \sigma_P \quad (6.4)$$

donde σ_P es el parámetro de la función de utilidad del traspaso. Igualmente, para AE_b , que implica un traspaso desde AE_a ($B_{ij} = 0$), se obtiene:

$$\Phi_b = \omega \cdot (-\log(P_b)) \quad (6.5)$$

Si se considerara una situación límite, se igualarían ambas utilidades globales, permitiendo establecer el valor de σ_P que daría lugar a una situación de traspaso; así, se obtendría como resultado que $\sigma_P = -\log(1 - \chi)$. Se asumirá (criterio de diseño) que un usuario cambiaría de alternativa de acceso cuando se pueda ahorrar un 20 % frente al actual AE ($\chi = 0.20$). Sustituyendo en la expresión anterior, se obtiene que $\sigma_P \approx 0.10$.

Relación entre los criterios de carga y traspaso

En este caso se asume que el operador desea hacer uso de una estrategia basada únicamente en los criterios de carga y traspaso. Siguiendo un análisis similar al anterior, cuando el usuario se conecta a un determinado AE_a , con carga relativa actual L_a , la correspondiente utilidad global es la que se muestra a continuación:

$$\Phi_a = \omega \cdot \sigma_L + \omega \cdot (1 - L_a^2) \quad (6.6)$$

Por otra parte, para AE_b , ya que implica un traspaso desde AE_a ($B_{ij} = 0$), se tiene que:

$$\Phi_b = \omega \cdot (1 - L_b^2) \quad (6.7)$$

Cuando tanto Φ_a como Φ_b toman el mismo valor (situación límite), se obtiene como resultado una ecuación hiperbólica:

$$\frac{L_a^2}{\sigma_L} - \frac{L_b^2}{\sigma_L} = 1 \quad (6.8)$$

La Figura 6.5 muestra las curvas que se obtienen para diferentes valores de σ_L (desde 0.1 a 0.5). Estas establecen las áreas con las combinaciones de las cargas de los AE actual y destino, que harían que el usuario optase por cambiar a otro AE. La línea recta, que se corresponde con $\sigma_L = 0$, se puede considerar como el caso límite, cuando no se tiene en cuenta el criterio de traspaso dentro de la utilidad global. Como se puede observar, cuanto mayor sea el valor de σ_L , menor es el área bajo la curva y, por lo tanto, menor es la probabilidad de realizar un cambio de AE. En este sentido, parece plausible elegir un valor pequeño de σ_L sin

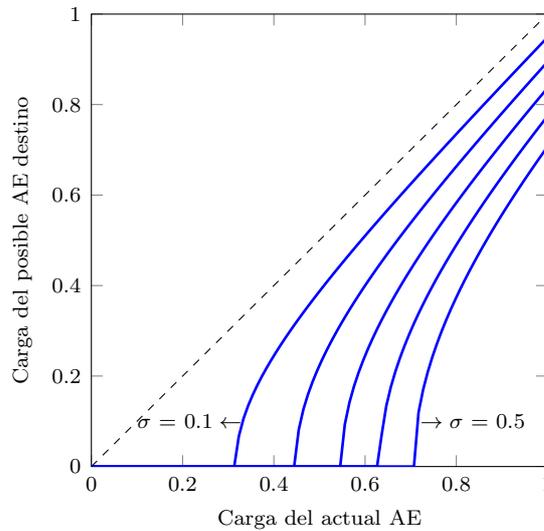


Figura 6.5: Función hiperbólica de la carga

Tabla 6.6: Tecnologías involucradas en el escenario MC-02

Operador	Cobertura (m)	Capacidad (TUs)	# Estaciones base
Tradicional	600	20	4
Novel	600	20	2

llegar al límite (línea recta). Considerando esas restricciones, en este análisis se ha adoptado como parámetro de diseño el valor de $\sigma_L = 0.1$.

El análisis se llevó a cabo sobre un escenario que incorpora un número de estaciones base de una única tecnología (imitando un despliegue tradicional de tipo celular), tal como se muestra en la Tabla 6.6. Se asume que existen dos operadores, el primero se podría ver como un operador tradicional, con un despliegue algo mayor (en términos del número de estaciones base), mientras que el segundo emularía un operador novel, con una infraestructura más reducida, pero que intenta obtener una cuota del mercado mediante una estrategia de precios más agresiva. Además, se considera un área cuadrada de 1000 m de lado, en la que las estaciones base se despliegan sin ninguna planificación previa (aunque mantienen una distancia mínima entre ellas cuando pertenecen al mismo operador). La Figura 6.6 muestra el escenario concreto que se utilizará en el análisis.

Se despliegan 250 usuarios de forma aleatoria, que se mueven siguiendo un modelo *Random Waypoint* con una velocidad de tipo peatón, aleatoriamente seleccionada dentro del intervalo $[1, 3]$ (m/s). Cada usuario empezaría hacer uso de los servicios por medio de un modelo *ON-OFF* en el que tanto el tiempo entre llamadas como el tiempo de duración del servicio se modelan mediante variables aleatorias exponencial negativas con medias de 120 y 60 segundos, respectivamente. Se asume que la capacidad de los servicios solicitados por los usuarios es igual a 1 TU, por lo que una llamada concreta de x segundos tendría un coste de $x \cdot p$ en unidades monetarias MU (ver abstracción en Sección 5.2.1), donde p es el precio que actualmente ofrece la estación base seleccionada.

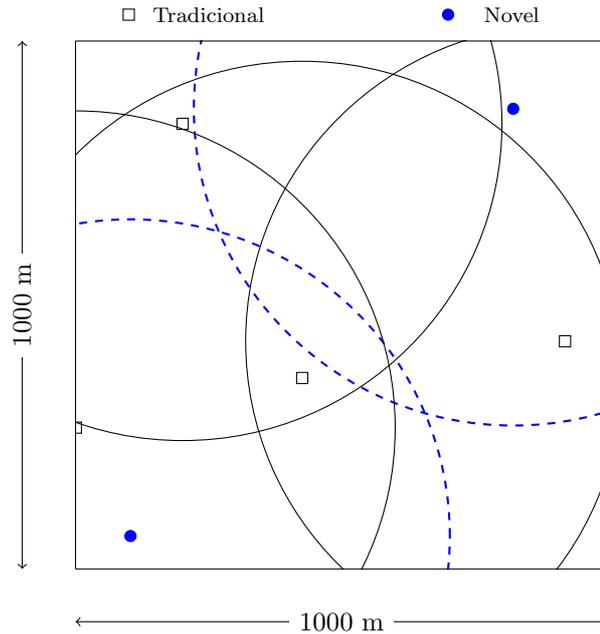


Figura 6.6: Despliegue de red del escenario MC-02

6.2.2. Resultados de la simulación

En esta sección se describen los resultados obtenidos al utilizar las 4 estrategias de selección de acceso presentadas en la Tabla 6.5. Todas las simulaciones se ejecutaron con una duración de 3600 segundos, y se llevaron a cabo 100 ejecuciones independientes para cada caso. Los resultados obtenidos se agrupan en función de la entidad (usuario/operador) sobre la que tienen más impacto. La Figura 6.7 se centra en las métricas que permiten dar una idea del rendimiento percibido por los usuarios, mientras que la Figura 6.8 muestra un conjunto de resultados que ilustran los beneficios que las estrategias proporcionan a los dos operadores.

Se asume que el operador tradicional no cambia su función de precio (Figura 6.4), pero sí se varía el precio máximo del operador novel, de acuerdo a un porcentaje del utilizado por el tradicional. En este sentido, se define el factor de precio (ψ) como sigue:

$$\psi = \frac{(p_{\max})_{\text{novel}}}{(p_{\max})_{\text{tradicional}}} \quad (6.9)$$

En particular, se incrementa ψ desde 0.1 (donde el precio máximo del operador novel es el 10% del tradicional) hasta 1.0, donde los dos operadores usan la misma función de precio, como se muestra en la Figura 6.4. Se debe tener en cuenta que, en todos los casos, el p_{\max} del operador tradicional se fija a 1.0 MU.

La Figura 6.7a muestra la probabilidad de que cualquier llamada finalice con éxito. La primera conclusión que se puede extraer es que esta métrica prácticamente no se ve afectada, ya que la probabilidad de éxito se mantiene estable para todos los valores de ψ , mostrando unos resultados cercanos a 1.0. La estrategia PBLB parece ser la única que se aleja ligeramente del rendimiento óptimo mostrado por las demás alternativas, aunque la disminución es prácticamente despreciable (0.5%). Por lo tanto, con los parámetros utilizados en este escenario en concreto, la probabilidad de que una llamada no finalice satisfactoriamente es bastante baja, mostrando de esta manera una QoS aceptable para todas las estrategias.

En las dos versiones mejoradas de las estrategias de selección de acceso, se incluye la minimización de traspasos como otro criterio a ser considerado en la función de utilidad agregada. Para analizar su efecto, la Figura 6.7b muestra el número medio de traspasos que se llevaron a cabo durante una llamada. Como se puede ver, no se manifiesta una influencia relevante de ψ sobre esta métrica, tal como ocurría con la probabilidad de éxito de las llamadas. Sin embargo, en este caso, sí aparece una diferencia clara entre las diversas estrategias. En LB, el número de traspasos por llamada se mantiene alrededor de 2.0, lo que de alguna manera puede reflejar un efecto rebote, consecuencia de que esta estrategia persigue únicamente el balanceo de carga. Cuando se incorpora la reducción del número de traspasos a la función de utilidad global (eLB), su influencia aparece claramente, ya que el número de traspasos por llamada se reduce a un valor alrededor de 0.4. En cuanto a la estrategia PBLB, se puede ver que el número medio de traspasos está ligeramente por encima de 1.0, reduciéndose incluso por debajo de 0.5 cuando se añade la reducción de traspasos en la función de utilidad global (ePBLB).

Por otro lado, el precio medio por llamada, que se muestra en la Figura 6.7c, sí se ve influenciado por el parámetro ψ , ya que éste determina la tarifa que el operador novel cobra por acceder a sus estaciones base. El incremento en aquellas estrategias que no tienen en cuenta el precio (LB y eLB) sigue una tendencia lineal, siendo los resultados de ambas prácticamente iguales. Para las dos estrategias que sí lo consideran (PBLB, ePBLB), el precio del servicio se ve claramente influenciado por el parámetro ψ . En este caso, la estrategia que da lugar a precios más baratos es la ePBLB, siendo ligeramente superiores en aquella que sólo favorece el criterio de precio (PBLB).

Con respecto a las métricas que reflejan el rendimiento desde la perspectiva de los operadores, las Figuras 6.8a y 6.8b muestran la carga relativa (cociente entre los recursos usados y disponibles) de las estaciones base de los operadores novel y tradicional, respectivamente. Las Figuras 6.8c y 6.8d se corresponden por su parte con los beneficios económicos que ambos obtienen en cada una de las estaciones base desplegadas. En el caso de las dos estrategias que no consideran el precio (LB y eLB), la carga no se ve afectada por el parámetro ψ y, como se puede ver, ambas llegan a un equilibrio casi ideal, esto es, la carga relativa es más o menos la misma para ambos operadores. Sin embargo, para las dos otras estrategias (PBLB y ePBLB) los resultados muestran una estrecha relación con el parámetro ψ . En este sentido, cuando el operador novel está ofreciendo precios bajos (es decir, ψ es pequeño), la carga relativa del operador tradicional es bastante baja (< 0.6), mientras que el operador novel llega alcanzar valores cercanos a 0.95. Por otro lado, a medida que ψ aumenta, la carga relativa del operador novel es cada vez más baja, mientras que la del tradicional aumenta. Este efecto es razonable, ya que un incremento en ψ realmente significa que los precios ofrecidos por el operador novel son más cercanos a los del tradicional. Se puede mencionar que cuando ψ es alto (> 0.9), los resultados (en términos de balanceo de carga) se igualan con aquellos alcanzados utilizando las estrategias de balanceo de carga puras (LB y eLB).

Por último, se podría afirmar que los resultados más relevantes son los relacionados con los ingresos obtenidos por los operadores. Recordar que la estrategia de precio del operador tradicional es la misma para todos los valores de ψ ($p_{\text{máx}} = 1.0$) y, por tanto, con los dos métodos de selección de acceso que no tienen en cuenta el precio (LB y eLB), los ingresos no cambian con ψ ; sin embargo, para el operador novel, se puede ver (para esas dos estrategias) un incremento lineal, que se corresponde con el aumento en el precio máximo utilizado por las estaciones base correspondientes. Por otro lado, cuando el precio se considera dentro de la estrategia de selección de acceso (PBLB y ePBLB), hay un claro impacto en los ingresos de los dos operadores. Para el operador tradicional, los ingresos siempre aumentan con ψ ; esto es

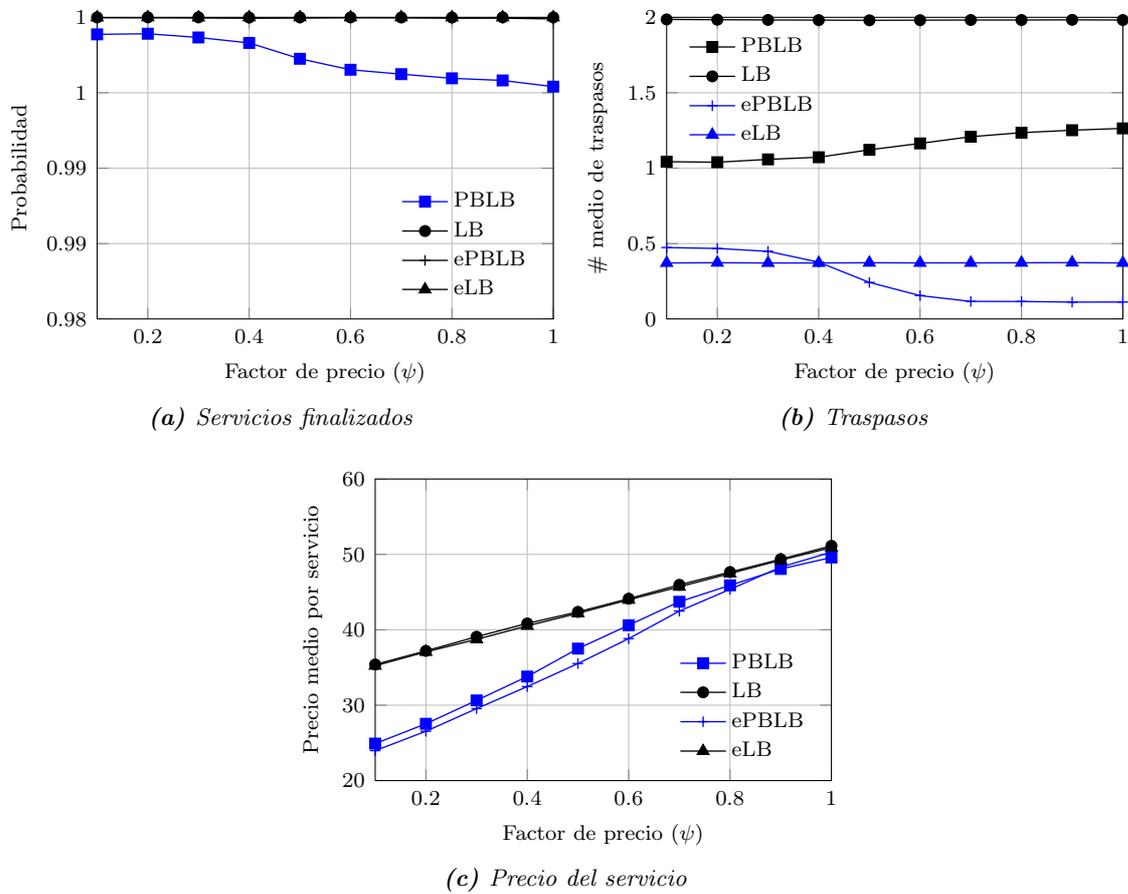


Figura 6.7: Prestaciones de las estrategias de acceso desde el punto de vista del usuario

debido a que cuanto más caro es el operador novel, más usuarios seleccionarán la alternativa tradicional, como ya se reflejó en los resultados de carga (ver Figura 6.8b). Por otra parte, la Figura 6.8c muestra que el operador novel no percibe una ganancia adicional significativa cuando $\psi > 0.7$; en este caso existe un equilibrio entre la reducción de la carga y el precio que el usuario está pagando. Además, cuando los usuarios tratan de mantenerse en la misma estación base tanto como sea posible (introduciendo la reducción de trasposos en la estrategia de selección de acceso, ePBLB) se puede ver que el operador novel obtiene algún beneficio adicional, a diferencia del tradicional (esto sólo es relevante cuando ψ es mayor que 0.6).

6.2.3. Discusión

En esta sección se ha analizado un esquema de balanceo de carga basado en el precio ofrecido por las estaciones base, que se ajusta de acuerdo a su capacidad disponible, con el fin de disuadir o atraer a los usuarios. Se ha mostrado que, únicamente utilizando la información acerca de los usuarios conectados, el método propuesto ofrece un rendimiento adecuado en comparación con una estrategia de balanceo de carga pura. Se ha utilizado un escenario en el que coexisten dos operadores: uno tradicional y otro novel. Se ha estudiado el impacto de establecer diferentes precios para el caso del operador novel, a diferencia del tradicional, cuya política de precios se ha mantenido constante. También se ha analizado el

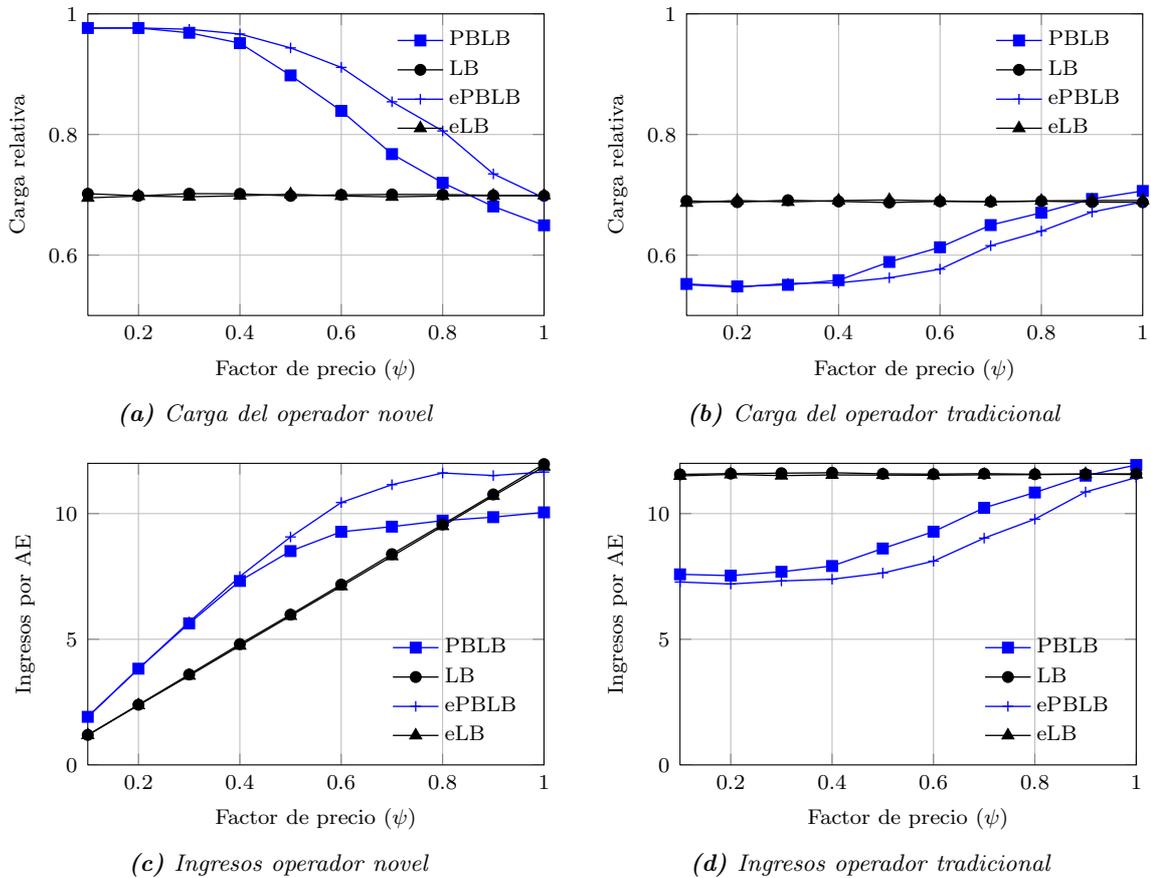


Figura 6.8: Prestaciones de las estrategias de acceso desde el punto de vista del operador

efecto que produce dicha variación en los ingresos obtenidos por los dos operadores, así como el rendimiento adicional en el equilibrio de carga alcanzado. Los resultados muestran que la carga del operador novel es mayor cuando ofrece precios más baratos, pero sin embargo esto no significa que consiga maximizar sus ingresos.

6.3. Escenario OG-01: Entorno genérico de optimización multi-RAT y multi-operador

En este apartado se analiza el primer escenario sobre el que se pretende determinar, a nivel global, el comportamiento óptimo que se puede alcanzar, mediante el uso de técnicas de programación lineal embebidas dentro del marco de la metodología detallada en la Sección 4.2. Para ello, de forma similar al enfoque adoptado en el escenario MC-01, se construye un escenario constituido por una red inalámbrica heterogénea (que abarca diversas tecnologías y operadores). En este caso el análisis se afronta como un problema de optimización, definiendo una función objetivo que, a su vez, hace uso de una función de utilidad capaz de modular el peso dado a los diferentes criterios seleccionados. Los resultados obtenidos pueden ayudar a establecer, entre otros, la combinación de los diversos pesos que deben ser utilizados por los algoritmos de selección de acceso a fin de garantizar un comportamiento óptimo.

Tabla 6.7: Tecnologías incluidas en el escenario OG-01

ID	Cobertura (m)	Capacidad	Número de AE	Operador
RAT_0	600	20	4	A
RAT_1	80	5	16	B
RAT_2	60	5	20	B

Tabla 6.8: Características del modelo Random WayPoint usado en el escenario OG-01

Característica	Valor
Velocidad	$\mathbb{U}[2, 3]$ m/s
Tiempo de movimiento	$\mathbb{U}[100, 120]$ m/s
Tiempo de pausa	$\mathbb{U}[5, 10]$ s
Política en el borde	Reflexión

Además de asegurar la validez de la herramienta oGASE, una característica importante a destacar es que, en este caso, no se modelan los servicios, tal como se hace en los escenarios analizados con mCASE. La relación existente entre el usuario y el AE, se define desde el punto de vista de la conectividad necesaria para cursar un servicio. En este sentido, la capacidad de los AE se modela, de forma genérica, como el número máximo de usuarios que pueden estar asociados al AE, es decir, sin considerar el tráfico subyacente.

6.3.1. Descripción del escenario

De forma similar al escenario MC-01, se busca garantizar una relevante heterogeneidad, utilizando tres AE diferentes, tal como se muestra en la Tabla 6.7. El primero emula una tecnología que se asemeja a las características de las comunicaciones celulares tradicionales (por ejemplo, GSM), ya que presenta una cobertura notablemente mayor que las otras, así como también una mayor capacidad. Los otros dos elementos de acceso son similares a los puntos de acceso WLAN, con una cobertura y capacidad mucho menores.

Se asume que hay dos operadores. El primero es el operador incumbente (**A**), como tal gestiona los elementos de acceso de la red celular (RAT_0); el segundo (**B**) emularía un operador novel, que ofrece un acceso menos convencional, por medio de los elementos de acceso con tecnologías RAT_1 y RAT_2 . Por otra parte, se considera un área de 1000×1000 m², sobre el cual se despliega de manera aleatoria (es decir, sin ninguna planificación previa) los elementos de acceso, manteniendo una mínima distancia entre ellos, siempre y cuando pertenezcan al mismo operador y usen la misma tecnología. La Figura 6.9 muestra el despliegue final que será utilizado. Como se puede ver, los cuatro elementos de acceso de tipo RAT_0 cubren el escenario por completo, dando lugar a un gran solapamiento entre sus áreas de cobertura; por el contrario, la superficie cubierta por el operador B es notablemente inferior.

Sobre dicho escenario se distribuyen 200 usuarios, asumiendo que el 60% de ellos pertenecen al operador A, mientras que los otros usuarios tienen un acuerdo con el operador menos convencional (B). A pesar de que los usuarios pueden tener alguna relación contractual con un operador, se asume que todos tienen la posibilidad de utilizar cualquiera de las tecnologías involucradas. Al inicio de la simulación se despliegan todos los usuarios de manera aleatoria, pero posteriormente se mueven de acuerdo al modelo *Random Waypoint*, con las características mostradas en la Tabla 6.8.

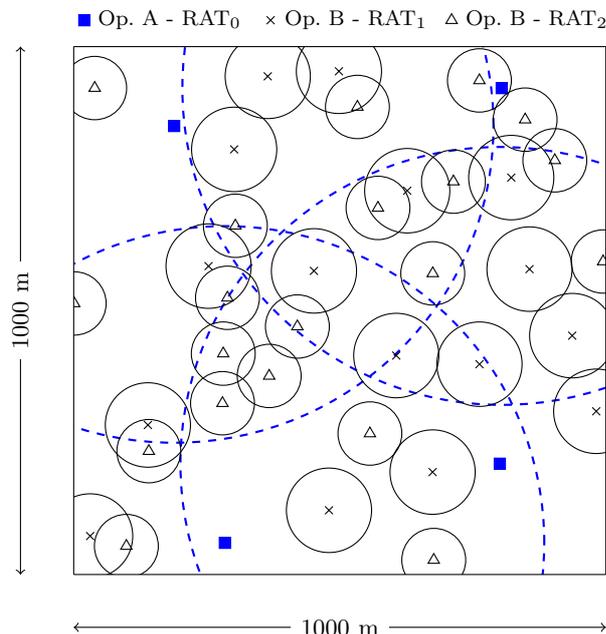


Figura 6.9: Despliegue de red del escenario OG-01

Para el análisis realizado en este apartado, se utilizará un conjunto de criterios, provenientes, por una parte, de los definidos para oGASE (Sección 4.2.4): conectividad (α_{ijk}) y traspaso (β_{ijk}); mientras que también se hará uso de algunos definidos para mCASE (Sección 4.1.4): operador preferido (Δ_{ij}), y calidad del enlace (E_{ij}). Aunque algunos criterios se especifican en base a una relación más estrecha con la metodología bajo la cual han sido definidas, otros mantienen un perfil más genérico, por lo que pueden ser utilizados indistintamente en ambos enfoques.

Algunos de los criterios seleccionados incorporan parámetros que forman parte de su definición, cuyos valores se especifican en cada análisis como decisiones de diseño. Por ello, se ha fijado $\lambda = 0.0$ para el criterio de conectividad, y $\mu = \rho = 1.0$, correspondientes a los criterios de traspaso y operador preferido, respectivamente. Por otra parte, como en este caso los servicios no serán modelados, la componente k que lo representa en la formulación del problema de optimización (Sección 4.2.3), no se será utilizada. Por tanto, la función de utilidad agregada (u_{ij}), que permite establecer una clasificación de los AE disponibles, se define en base a una combinación lineal de los criterios mencionados, tal como sigue:

$$u_{ij} = \omega_{co} \cdot \alpha_{ij} + \omega_{po} \cdot \Delta_{ij} + \omega_{ho} \cdot \beta_{ij} + \omega_{lq} \cdot E_{ij} \quad (6.10)$$

La Tabla 6.9 muestra las diferentes estrategias de selección de acceso que han sido sintetizadas modificando el valor de los diferentes pesos, fortaleciendo o priorizando algunos de los aspectos con los que guardan relación. En este sentido, la estrategia **A** tiene como único objetivo maximizar el número de usuarios conectados; se debe tener en cuenta que ω_{co} representa la voluntad de optimizar la conectividad (sin estar influenciado por el resto de los parámetros) y, por lo tanto, la estrategia **A** tiene como objetivo encontrar cuál es la mayor conectividad que se puede lograr, de tal forma que se pueda realizar una comparación con las demás opciones, en los que ω_{co} toma un valor residual.

Tabla 6.9: Estrategias de selección de acceso usadas en OG-01

Peso	A	B	C	D	E	F	G	H
ω_{co}	1.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.10	0.10	0.10
ω_{po}	0.0	0.3	0.9	0.0	0.0	0.45	0.45	0.00
ω_{ho}	0.0	0.3	0.0	0.9	0.0	0.45	0.00	0.45
ω_{lq}	0.0	0.3	0.0	0.0	0.9	0.00	0.45	0.45

La estrategia **B** proporciona el mismo peso a cada uno de los otros tres parámetros (excepto la conectividad), para analizar el efecto de una distribución equitativa de los pesos en la función de utilidad. Las estrategias **C**, **D** y **E** se enfocan, cada uno de ellas, en un único criterio (operador preferido, número de traspasos y calidad del enlace, respectivamente), proporcionando una relevancia residual a la probabilidad de conexión, con el fin de estudiar el grado de influencia que cada uno de ellos tienen de manera individual. Finalmente, las estrategias **F**, **G** y **H** favorecen, cada una, dos de los criterios anteriormente mencionados, mientras que se sigue otorgando una relevancia residual para la conectividad, con el objetivo de evaluar el efecto combinado que producen dos parámetros de forma simultánea.

6.3.2. Resultados de la simulación

A continuación se discuten los resultados que se han obtenido usando las 8 estrategias de selección de acceso descritas anteriormente. Cada una de las simulaciones tiene una duración de 2000 segundos, dentro de los cuales se hacen uso de fotografías del escenario, tomados cada 10 segundos, lo que da lugar a la resolución de 200 problemas de optimización. Para evaluar el rendimiento de las diferentes alternativas, se estudiarán las siguientes métricas:

- **Probabilidad de conexión.** Es el parámetro básico, ya que sólo considera si el usuario fue capaz de establecer o no una conexión.
- **Conexión con el operador preferido.** Tiene en cuenta si la conexión se realizó con un elemento de acceso que pertenezca al operador preferido del usuario.
- **Número de traspasos.** Mide el número de cambios de elemento de acceso que se realizan en cada fotografía.
- **Calidad media del enlace.** Proporciona el valor medio de las calidades de todos los enlaces que se establecieron.
- **Carga disponible.** Se utiliza para analizar la capacidad disponible en cada una de las tecnologías involucradas. Este parámetro puede ser utilizado para determinar si la red podría aceptar más usuarios.
- **Tráfico del operador.** En este caso, se analizará la carga cursada por cada uno de los dos operadores, identificando el porcentaje de conexiones de usuarios pertenecientes al otro operador, que podría ser usada para estimar el ingreso generado por los procesos de itinerancia.

Como primer paso, para determinar la validez de la herramienta oGASE, se estudia la evolución instantánea del rendimiento de una estrategia en particular, en base a una única

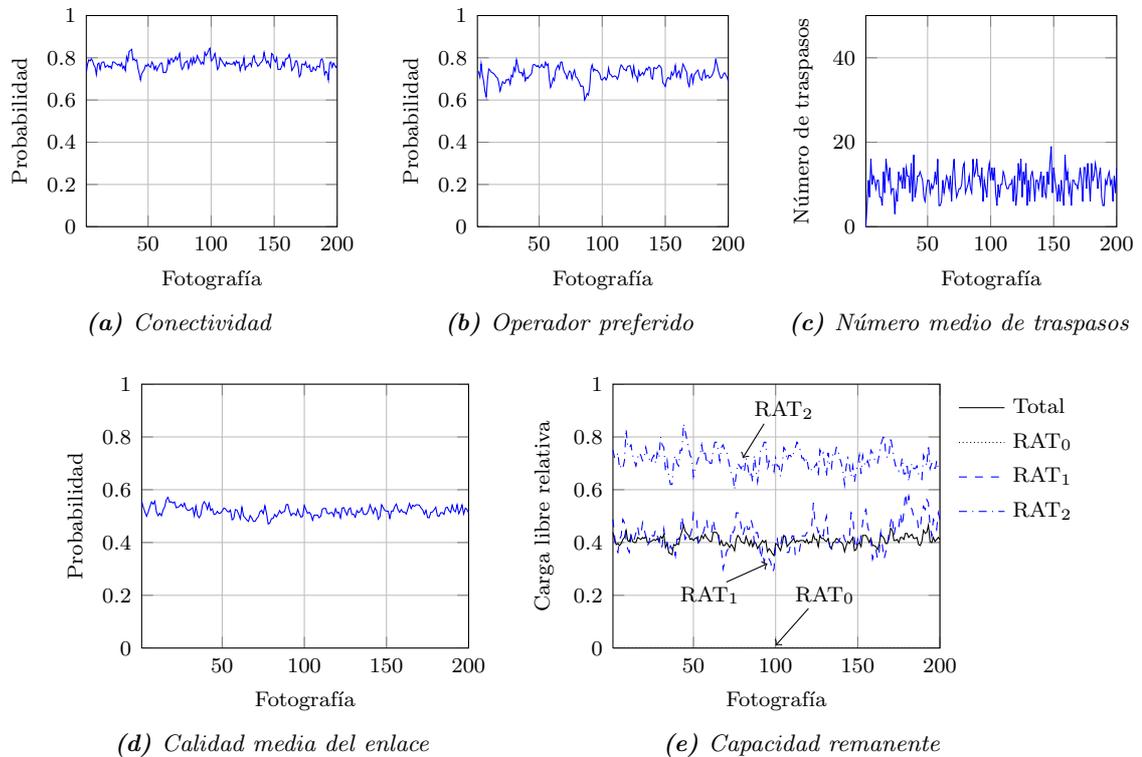


Figura 6.10: Variación instantánea de los parámetros de mérito para la estrategia B

traza de datos, lo que permite obtener una valoración acerca de la estabilidad de los resultados. Se debe tener en cuenta que, de acuerdo a lo definido en la Sección 5.3, cada traza está constituida por un conjunto de fotografías que representan el estado de la red a lo largo del tiempo de la simulación. Después, se realizan 10 ejecuciones independientes (cada una de ellas con una traza diferente) para cada una de las estrategias definidas en la Tabla 6.9, obteniéndose la media de los resultados, a fin de garantizar intervalos de confianza ajustados, y poder realizar una comparación apropiada del comportamiento de dichas estrategias. Finalmente, se fijará el valor de dos de los pesos, variando los otros dos, con el fin de analizar su influencia sobre el rendimiento del sistema.

Para el primer análisis se ha elegido la estrategia **B**, cuyos resultados se presentan en la Figura 6.10, que muestra la probabilidad de conectividad, el porcentaje de conexiones con el operador preferido, el número de traspasos, la calidad media del enlace, así como la capacidad remanente de la red para las distintas RAT. Como se puede observar, ninguno de los casos presenta una variación notable alrededor del comportamiento medio. La probabilidad de conexión alcanza un valor cercano al 80 %, mientras que hasta un 75 % de las conexiones se establecen con el operador preferido. Se debe tener en cuenta que la distribución de los usuarios entre los dos operadores (*Market Share*) indica que el 60 % de ellos son “clientes” del operador incumbente. También se observa que el parámetro que presenta una mayor variabilidad es el número de traspasos por fotografía, aunque se mantiene (para esta configuración particular) por debajo de 20 en todos los casos. En cuanto a la calidad media del enlace, se observa que se mantiene ligeramente por encima del 50 %, con poca variabilidad en torno a ella.

Lo que es aún más interesante es el análisis de la capacidad disponible para los diferentes tipos de elementos de acceso. Se puede observar que la capacidad libre total está ligeramente por debajo del 40%. Aunque esto pueda parecer extraño (sobre todo mirando los resultados de conectividad), hay que tener en cuenta que los elementos de acceso que usan RAT_1 y RAT_2 cubren un área mucho menor. Así, a pesar de tener una capacidad total de 180 ($5 \cdot 16 + 5 \cdot 20$), incluso mayor que el ofrecido por los elementos de acceso con RAT_0 , no son capaces de satisfacer toda la demanda ya que no hay suficientes usuarios dentro de sus áreas de cobertura. De hecho, la figura también permite inferir la mayor cobertura del RAT_1 , ya que la capacidad disponible es inferior a la observada para el RAT_2 , cuyo factor de utilización es más bien bajo. Por último, también se puede ver que los elementos de acceso de tipo RAT_0 están cargados completamente, ya que, como se mostró en la Figura 6.9, cubren completamente todo el área bajo análisis y, por lo tanto, es muy probable que existan muchos usuarios que tengan como única alternativa, precisamente, el conectarse con tales elementos de acceso.

Aunque los resultados instantáneos permiten dar una idea preliminar sobre el comportamiento de las diferentes estrategias de selección de acceso, es más interesante compararlas entre sí, para estudiar sus ventajas e inconvenientes. Al final, si se realizaran todas las combinaciones posibles para los diferentes parámetros, sería posible establecer la combinación que conduce a un rendimiento óptimo. En este caso, se comparan las 8 alternativas que se presentaron en la Tabla 6.9, llevando a cabo, para cada uno de ellas, 10 ejecuciones independientes, promediando los resultados correspondientes. Es decir, cada una de las barras, que se muestran en la figura, es el resultado de promediar las salidas de los 2000 problemas de optimización correspondientes.

En primer lugar, la Figura 6.11a muestra la conectividad observada para las 8 estrategias; se puede concluir que las diferentes combinaciones no tienen una fuerte influencia sobre los resultados obtenidos, ya que en todos los casos, la probabilidad de conectividad está muy cerca de 0.8. El gráfico muestra una ligera disminución (por debajo del 10%) en las estrategias **B**, **C**, **F** y **G**. En todos ellos se favorecen las conexiones con el operador preferido y, por lo tanto, los elementos de acceso que utilizan RAT_0 , que pertenecen al operador incumbente, completan su capacidad disponible, lo que impide que algunos usuarios puedan conectarse con ese operador. Esta circunstancia se ve acentuada por el hecho de que es menos probable establecer una conexión con los elementos de acceso de tipo RAT_1 o RAT_2 , ya que cubren un área más pequeña.

Por otro lado, en la Figura 6.11b se observa que existe una diferencia mucho más relevante en lo que se refiere a las conexiones con operadores no preferidos, dependiendo de la estrategia de selección de acceso que se esté utilizando. En aquellas combinaciones en las que el peso otorgado al parámetro ω_{po} es nula (**A**, **D**, **E** y **H**) la probabilidad de establecer una conexión con un elemento de acceso del operador preferido no varía (permaneciendo alrededor del 50%). Se debe tener en cuenta que el 60% de los usuarios son “clientes” del operador que gestiona los elementos de acceso con mayor cobertura (RAT_0) y, por lo tanto, tienen más posibilidades de estar conectados con su operador preferido. Para el resto de estrategias de selección de acceso, los resultados muestran que la ganancia adicional que se obtiene al aumentar ω_{po} no es relevante, por ejemplo, el incremento de dicho parámetro entre las estrategias **B** y **C** (por un factor de tres) no tiene un gran impacto sobre los resultados obtenidos. También cabe mencionar el hecho de que en las estrategias **F** y **G** la probabilidad de conexión a un operador preferido es, incluso, ligeramente mayor que en la **C**, a pesar de que en esta última opción la función de utilidad favorece únicamente la conexión con el operador preferido. Esto revela que, para determinados casos, el efecto combinado con otro parámetro puede ser incluso mejor que potenciar únicamente aquel.

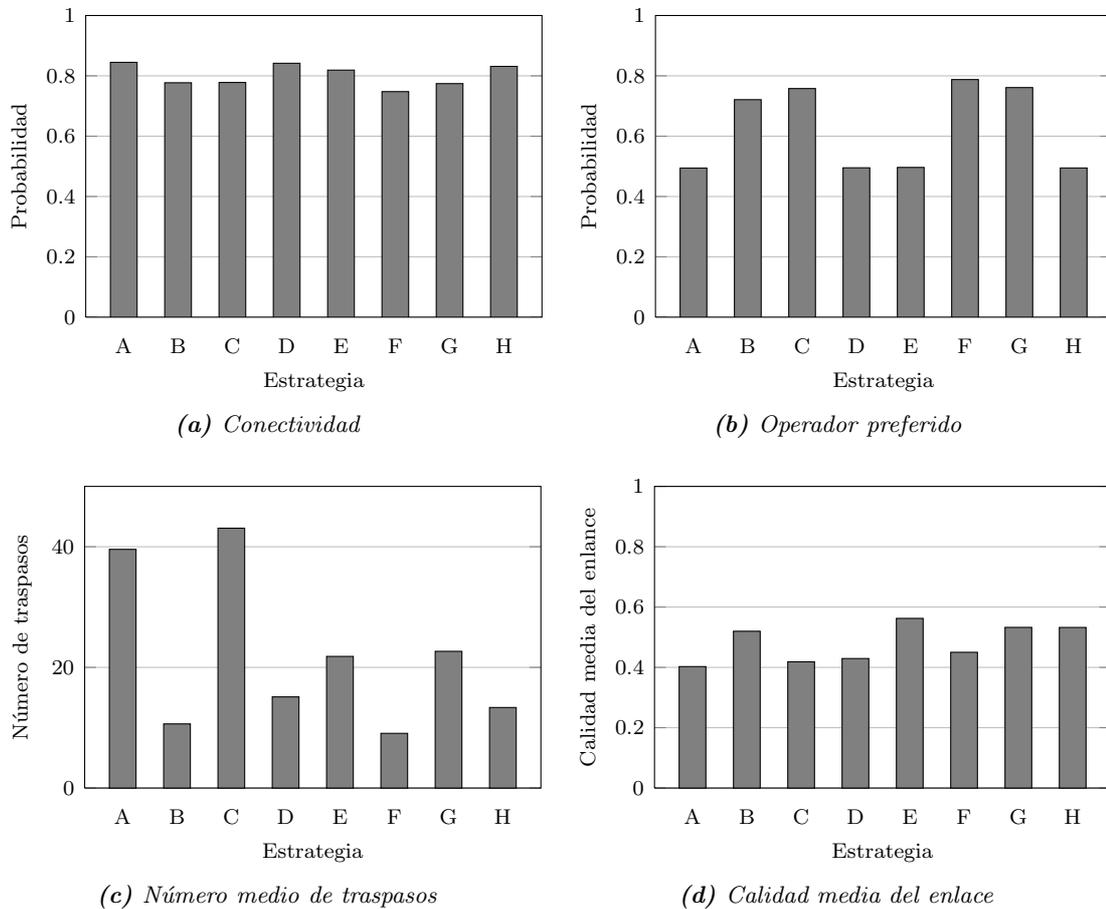


Figura 6.11: Rendimiento de las estrategias de selección de acceso

La Figura 6.11c muestra de manera más relevante las consecuencias de combinar criterios en los proceso de selección de acceso. Tal como se observa, la estrategia **C**, que solo tiene en cuenta el operador preferido, proporciona el peor rendimiento en cuanto al número de traspasos se refiere, pero el efecto combinado de este parámetro con ω_{ho} (estrategia **F**), produce, por contra, el resultado más favorable. La razón es que, si se conecta a un elemento de acceso de tipo RAT_0 (los que pertenecen al operador dominante), es menos probable que el usuario tenga que hacer un traspaso en las siguientes fotografías, ya que el área cubierta por los elementos de acceso es mucho mayor. También se observa una clara correlación entre los criterios de traspasos y calidad del enlace, ya que favorece los enlaces con mayor calidad ocasiona que se establezcan más conexiones con elementos de acceso más cercanos y, por lo tanto, será menos probable que se requiera un traspaso en las siguientes fotografías. Debido a ello las estrategias **E** y **G**, que hacen uso del parámetro ω_{lq} , ofrecen un mejor rendimiento en comparación con **A** y **C**, en las que $\omega_{lq} = 0.0$. Incluso el efecto combinado del traspaso y la calidad del enlace (estrategia **H**) mejora ligeramente el rendimiento ofrecido por la estrategia **D**, que solo favorece el parámetro de traspaso. Este aspecto también queda reflejado en la Figura 6.11d, que muestra que el efecto combinado de la estrategia **H** (ω_{ho} y ω_{lq}) hace que la calidad media de las conexiones establecidas mejore notablemente (alrededor del 20%)

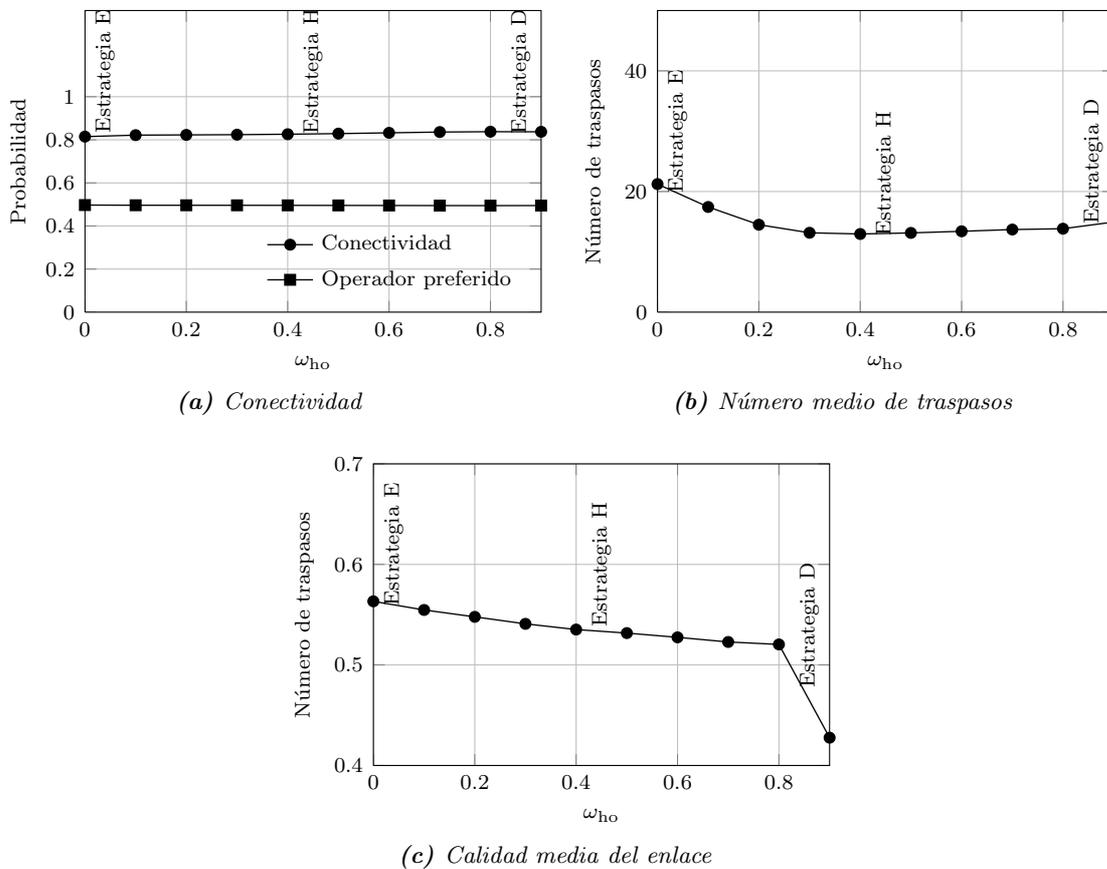


Figura 6.12: Rendimiento para distintas combinaciones de $(\omega_{ho}, \omega_{lq})$

con respecto al proporcionado por la estrategia **D**, sin afectar negativamente al número de traspasos.

Para analizar mejor la relación entre algunos de los parámetros de la función de utilidad global y su impacto sobre los resultados de rendimiento, se ha configurado la herramienta oGASE para mantener constante los valores de ω_{co} y ω_{op} (en 0.1 y 0.0, respectivamente), mientras se realizan diversas combinaciones de ω_{ho} y ω_{lq} , aumentando ω_{ho} de 0.0 a 0.9, lo que implica disminuir ω_{lq} de 0.9 a 0.0, para mantener la suma de los pesos igual a 1. Esto también se puede ver como una evolución, más granulada, de los pesos entre las estrategias **E** y **D** (apareciendo **H** entre ellas). Para cada uno de los casos, se analizaron 100 trazas del escenario, de 200 fotografías cada una, lo que significa que cada punto de los gráficos presentados es el resultado de promediar 20.000 problemas de optimización, para asegurar intervalos de confianza lo suficientemente acotados. La Figura 6.12 representa los resultados correspondientes; mostrando en la Figura 6.12a, que los parámetros ω_{ho} y ω_{lq} no tienen ninguna influencia en la probabilidad de conectarse a cualquier operador, ni en la de estar conectado con el operador preferido, lo que en cierta forma se puede esperar, ya que los otros parámetros (ω_{co} y ω_{op}) permanecen fijos. En cuanto al número de traspasos (Figura 6.12b), se observa que éste se reduce conforme se incrementa el valor de ω_{ho} , sin embargo, cuando $\omega_{ho} > 0.4$, el número de traspasos no sigue disminuyendo, sino que aumenta ligeramente. En este caso, la función de utilidad otorga menos importancia al establecimiento de las conexiones con las estaciones base cercanas (ω_{lq} es pequeño) y, por tanto, la probabilidad de que se

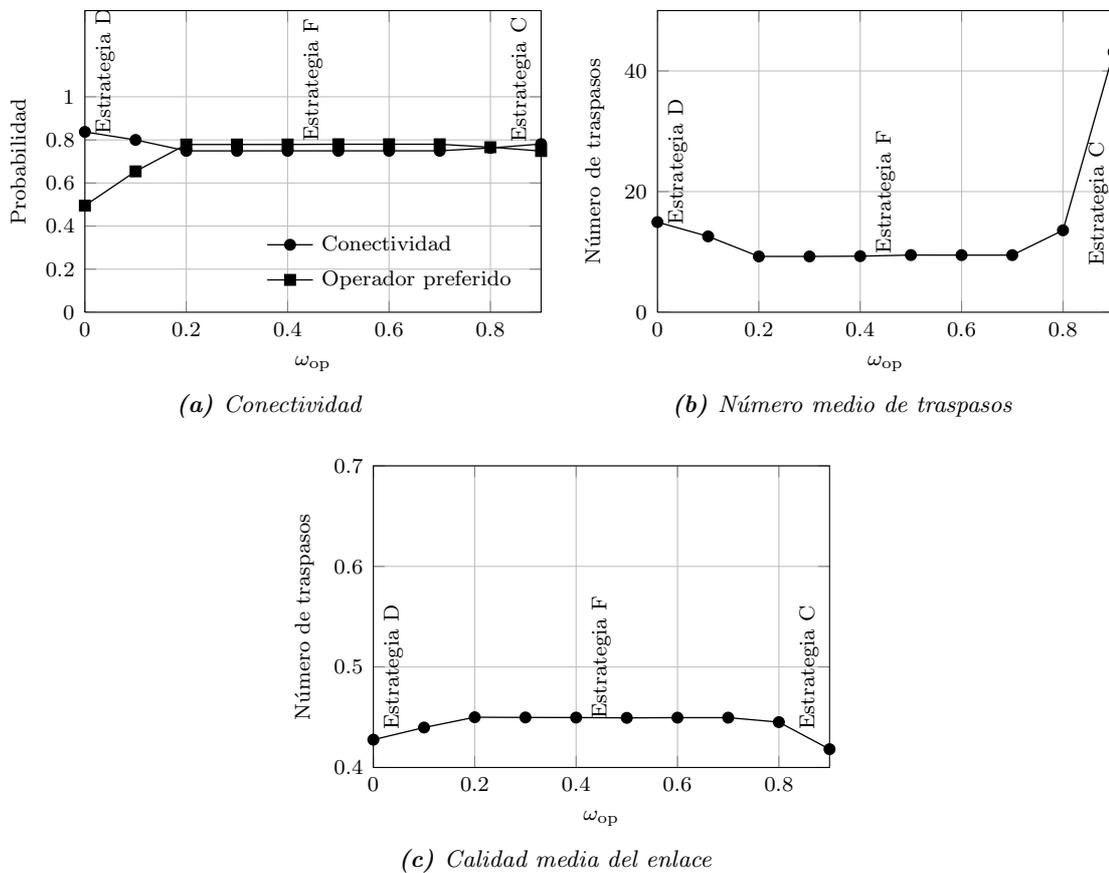


Figura 6.13: Rendimiento para distintas combinaciones de $(\omega_{op}, \omega_{ho})$

requiera un traspaso en próximas fotografías (debido a la movilidad del nodo) sería mayor. En cuanto a la calidad media del enlace, el comportamiento se acerca más a lo esperado, ya que ésta disminuye conforme la función de utilidad da menor relevancia al parámetro con el que guarda una relación directa (ω_{lq} se hace más pequeño). También se puede ver que la tendencia de disminución es más bien suave, excepto para la última estrategia (D), en el que la función de utilidad favorece sólo a la minimización de los traspasos, causando una caída abrupta en la calidad media del enlace.

La Figura 6.13 muestra los resultados que se obtuvieron al utilizar las diferentes combinaciones de ω_{op} y ω_{ho} , siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó para obtener la Figura 6.12, aunque esta vez manteniendo constantes los valores de ω_{co} y ω_{lq} a 0.1 y 0.0, respectivamente. Por eso, en este caso, se evoluciona entre las estrategias D y C (situándose F entre las dos). Se observa que existe una cierta influencia sobre la conectividad con el operador preferido (Figura 6.13a), lo que podría haberse esperado, ya que en realidad se está cambiando el peso asociado a dicho parámetro. Existe también un cierto impacto sobre el número de traspasos, la Figura 6.13b muestra que el mejor comportamiento no se obtiene con el valor más alto de ω_{ho} (cuando $\omega_{op} = 0.0$), sino para valores de $\omega_{ho} \leq 0.8$ ($\omega_{op} \geq 0.2$), en los cuales el número de traspasos se mantiene bastante estable, hasta que en la última estrategia $(\omega_{op}, \omega_{ho}) = (0.9, 0.0)$ se percibe un aumento bastante pronunciado. Si bien ω_{ho} tiene una gran influencia en el mejor rendimiento en

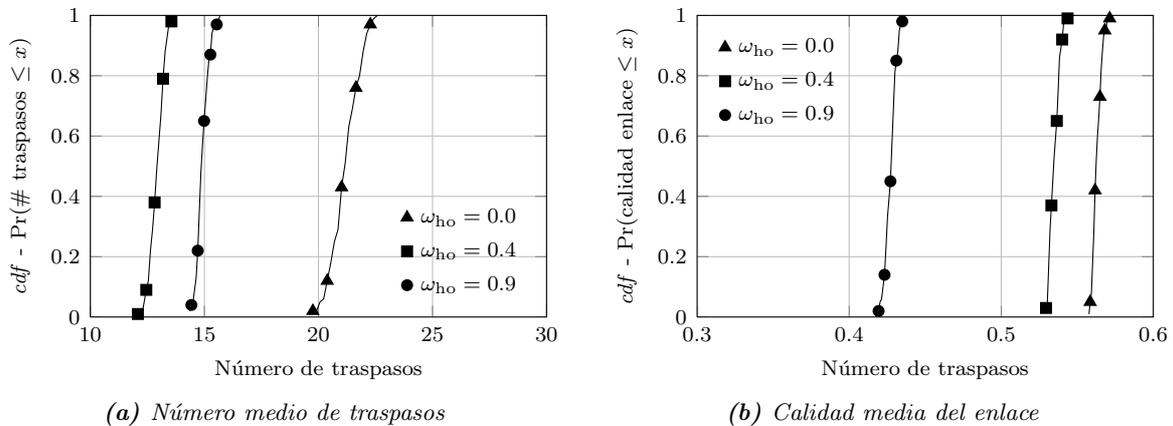


Figura 6.14: CDF de las tres estrategias mostradas en la Figura 6.12

cuanto al número de traspasos, cuando éste desaparece, el impacto negativo de ω_{op} es relevante, debido al alto porcentaje de usuarios que tienen como preferido al operador incumbente que, a su vez, cuenta con una gran cobertura. Otro aspecto interesante proviene del hecho de que, aunque no se otorgue ningún peso a la calidad del enlace (ω_{lq}), se observa una cierta variación en este parámetro aunque sigue siendo bastante estable para todas las estrategias (ver Figura 6.13c) y, sobretodo, se ponen de manifiesto valores mucho más bajos de los que se obtuvieron en el análisis anterior (Figura 6.12c).

Por otra parte, con el objetivo de verificar la validez estadística de los resultados mostrados en la Figura 6.12, para las tres estrategias mostradas como referencia (**E**, **H** y **D**, con valores para ω_{ho} de 0.0, 0.4 y 0.9, respectivamente), se realiza un análisis de la función de distribución acumulada (*Cumulative Distribution Function*, CDF), mostrada en la Figura 6.14, tanto del número de traspasos como de la calidad media del enlace. La principal conclusión es que no hay desviación relevante en torno al valor medio, por lo que se puede afirmar que los intervalos de confianza para los valores que se presentan en la Figura 6.12 son bastante ajustados. Se ha realizado un análisis similar para el caso de la Figura 6.13, llegándose a la misma conclusión.

Finalmente, mediante la Figura 6.15 se puede analizar la influencia de las diferentes combinaciones de los pesos sobre la capacidad de la red. En la Figura 6.15a, que muestra la carga relativa soportada por cada operador, se observa que, para todas las estrategias, se llegan a utilizar todos los recursos de los elementos de acceso con RAT_0 (que corresponde a la capacidad total del operador A), de manera similar a lo observado en los análisis previos. Al no haber capacidad disponible en este operador, la Figura 6.15b, que presenta la carga libre en cada tecnología, no muestra la barra correspondiente a dicho RAT. Esta circunstancia hace que la capacidad disponible de la red dependa principalmente de lo cargados que se encuentren los elementos de acceso del operador B . Esto se puede concluir al comparar la carga relativa del operador B en la Figura 6.15a, con la capacidad total disponible de la Figura 6.15b, observándose que esta última se mantiene cerca del 40% para todas las estrategias. Si bien se puede concluir que el operador B juega un papel relevante en la capacidad disponible de la red, la Figura 6.15b muestra una información adicional, ya que al presentar la capacidad libre de forma desagregada, se observa que se debe principalmente a los elementos de acceso de tipo RAT_2 , debido a la poca cobertura que ofrecen.

Con una clara relación con los últimos resultados, la Figura 6.15c muestra el número de usuarios conectados por cada operador, destacando aquellos que están conectados a su

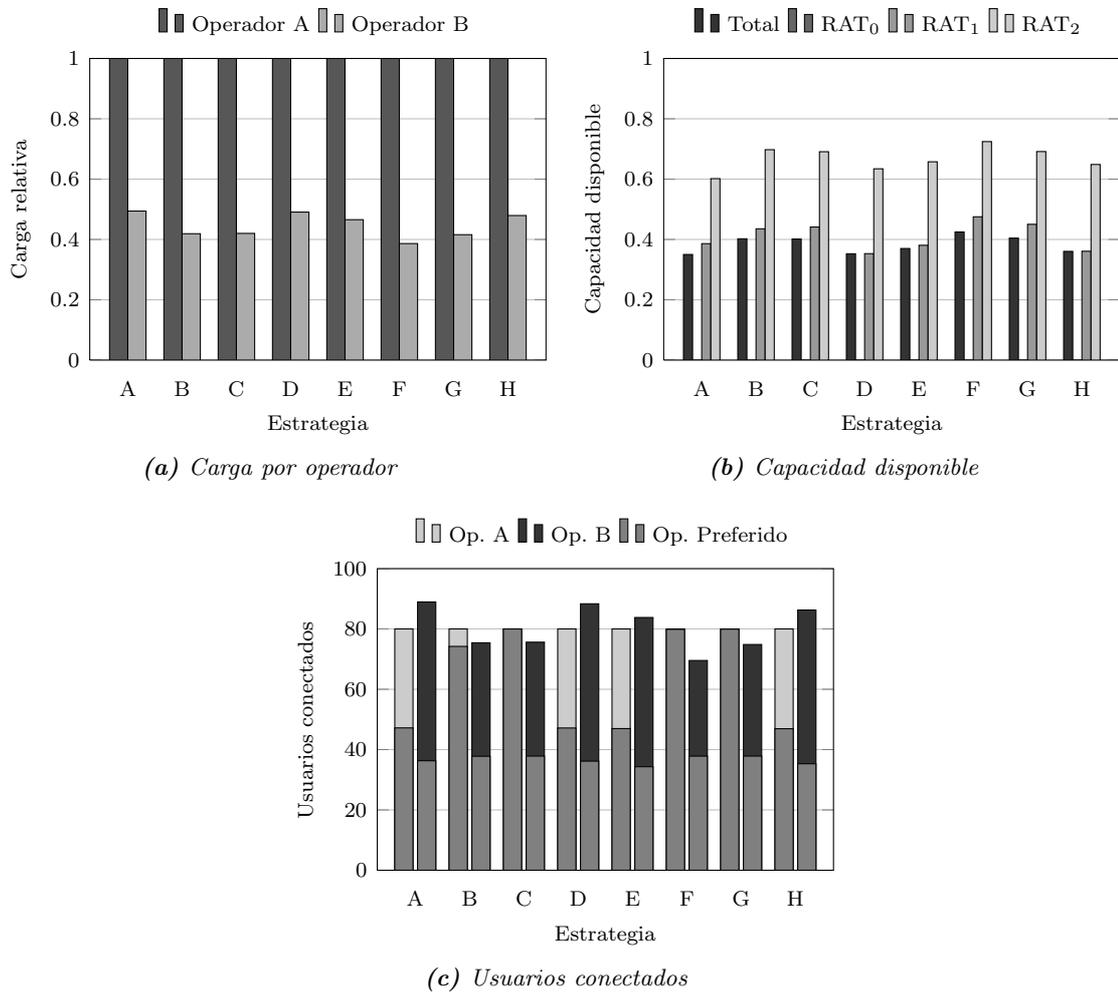


Figura 6.15: Rendimiento de las estrategias en función de la capacidad y la carga

operador preferido. Estos resultados reflejan la relevancia del parámetro ω_{op} , ya que en las estrategias en las que tiene un valor superior a 0.0 (**B**, **C**, **F** y **G**), casi todos los usuarios conectados lo hacen con su operador preferido, siempre y cuando sea el operador tradicional. Para el caso del operador **B**, únicamente el 50% de los usuarios conectados lo tienen como operador preferido. Teniendo en cuenta que la mayoría de los usuarios conectados al operador **A** son sus propios clientes (operador preferido), se reduciría el tráfico cursado por el operador **B**. Únicamente en aquellas alternativas en los que ω_{op} es igual a 0.0, el operador **B** supera al **A** en términos de número de usuarios conectados, aunque la capacidad total de **A** (como se muestra en la Figura 6.15a) es mucho mayor. Gracias a estos resultados, se podría definir como objetivo el establecimiento de diferentes mecanismos de cooperación para aumentar el beneficio conjunto de ambos operadores, mediante la aplicación de precios diferentes para el tráfico procedente de los clientes propios o de usuarios en itinerancia (aquellos que pertenecen al otro operador).

6.3.3. Discusión

Este escenario ha puesto de manifiesto las posibilidades que ofrece la aplicación de técnicas de programación lineal en el análisis de las estrategias de selección de acceso, sobre escenarios de redes heterogéneas, teniendo en cuenta tanto las tecnologías involucradas como los operadores implicados. Se ha definido un problema de optimización, en el que la función objetivo (a maximizar) puede ser adaptada, mediante el uso de un número de parámetros que establecen las diferentes prioridades que un usuario puede tener a la hora de decantarse por una alternativa de acceso. Usando un escenario con dos operadores y una notable heterogeneidad (diferentes tecnologías radio) se ha demostrado que hay ciertas combinaciones que ofrecen un mejor rendimiento que otras (por ejemplo, en función del número de traspasos y la calidad de los enlaces inalámbricos establecidos). El análisis ha mostrado, por ejemplo, que dar prioridad a la elección de los enlaces de mayor calidad provoca, indirectamente, una disminución del número de traspasos. Después de discutir los resultados de una serie de estrategias, se ha llevado a cabo un análisis más profundo, que ha permitido examinar la combinación de parámetros que ofrecen un mejor comportamiento. Por último, también se ha estudiado la influencia de los diferentes parámetros sobre la forma en que la carga se distribuye entre los distintos tipos de elementos de acceso y operadores.

Finalmente, dado que los resultados que se presentan dependen en gran medida de las características particulares del escenario, en términos de la cuota de mercado, número de usuarios, el despliegue de los elementos de acceso, etc., en el siguiente apartado se simplificará la heterogeneidad del escenario, con el objetivo de enfocar el estudio sobre algunos nuevos criterios, como el precio.

6.4. Escenario OG-02: Optimización en un entorno heterogéneo y multi-servicio

Siguiendo el mismo enfoque del escenario MC-02, en este apartado se analiza un escenario sobre el que se definen estrategias que buscan una meta específica. Pero a diferencia del MC-02, en este caso se persiguen dos objetivos diferentes. Por una parte se pretende analizar el comportamiento óptimo del escenario mediante la herramienta oGASE y, por otra parte, no se busca alcanzar un balanceo de la carga sino evaluar el impacto que producen los servicios, cuando éstos se asocian a aquella tecnología que mejor conjugue con sus características inherentes; incluyendo para ello el criterio de RAT *Affinity*, en lugar de la carga soportada por los AE. Además, existe una diferencia a destacar con respecto al escenario **OG-01**, debido a que se le ha añadido la capacidad de modelar de manera apropiada y diferenciada servicios de diversa naturaleza, lo que ha tenido una clara influencia en cómo el problema ha de ser planteado y que ha llevado a la integración de la entidad *Monitoring System*, descrito en la Sección 4.2.1, para mantener el histórico de las conexiones previas.

6.4.1. Descripción del escenario

El escenario considerado tiene un área cuadrada de $200 \times 200 m^2$ en la que se han desplegado dos tipos de AE diferentes (ver Figura 6.16). El primero de ellos se corresponde con una tecnología celular tradicional con un radio de cobertura de $150 m$, que cubre el escenario por completo, y una capacidad de 16 TU. Por su parte, el segundo tipo emula puntos de acceso Wi-Fi, con una cobertura de $50 m$ y una capacidad de 8 TU. Sobre este escenario

Tabla 6.10: Parámetros del análisis en OG-02

Estaciones base	
<i>Celular</i>	
Cobertura (m)	150
Capacidad (TU)	16
Política de tarificación	$P \in [0.1, 1.0]$, Umbrales = {0.2, 0.8}
<i>WiFi</i>	
Cobertura (m)	50
Capacidad (TU)	8
Política de tarificación	$P \in [0.1, 1.0]$, Umbrales = {0.2, 0.8}
Modelo de movilidad	
<i>Random Waypoint</i>	
Velocidad (m/s)	U[1, 3]
Periodo de movimiento (s)	U[800, 1000]
Periodo de reposo (s)	U[80, 100]
Modelo de servicio	
<i>Servicio 0: Voz</i>	
Modelo	On-Off
Tiempo entre llegadas (s)	120
Tiempo del servicio (s)	180
Capacidad (TU)	1
RAT <i>Affinity</i>	Celular
<i>Servicio 1: Transferencia de datos</i>	
Modelo	On-Off
Tiempo entre llegadas (s)	60
Tiempo del servicio (s)	120
Capacidad (TU)	2
RAT <i>Affinity</i>	WiFi
Parámetros generales	
Tiempo de simulación (s)	3600
# de fotografías	360
# of ejecuciones	10

se ha desplegado un número de usuarios que se han ido incrementado de 20 a 200, moviéndose de acuerdo al modelo *Random Waypoint*, según los parámetros que se muestran en la Tabla 6.10. Cada uno de los usuarios genera flujos de datos pertenecientes a dos tipos de servicios, de acuerdo a un modelo *ON-OFF*; además, mantienen una afinidad hacia una de las tecnologías. La política de tarificación que usarán los AE será la misma que se definió para el escenario MC-02 (ver Figura 6.4), de modo que aumentan el precio a medida que se encuentran más cargados. Se han realizado 10 ejecuciones independientes del escenario (cada una de ellas conlleva la resolución de 360 problemas de optimización) y se han obtenido los valores medios de los resultados.

En el ámbito de este escenario, del conjunto de criterios modelados en la Sección 4.2.4, se utilizarán los siguientes: conectividad (α_{ijk}), traspaso (β_{ijk}), precio (γ_{ijk}) y RAT *Affinity* (δ_{ijk}). El criterio de conectividad será un valor común para las diferentes estrategias, dando

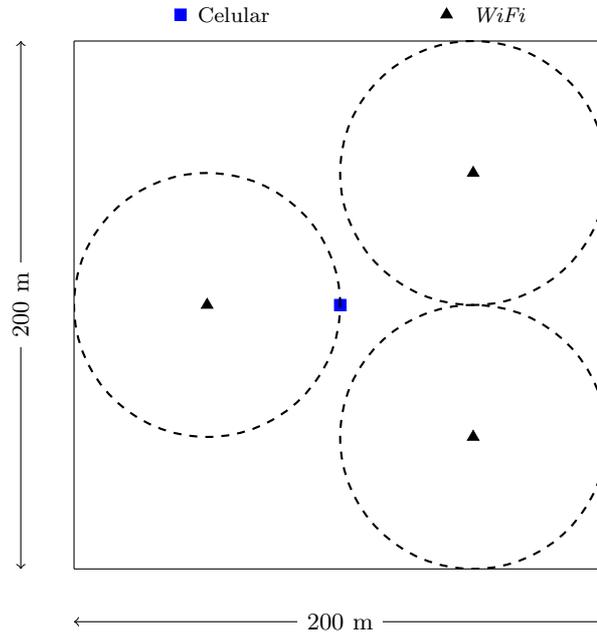


Figura 6.16: Despliegue de red del escenario OG-02

una cierta utilidad a la conectividad *per se*; priorizando, además, los servicios en curso sobre los nuevos, al asumirse que siempre es preferible (desde el punto de vista de la QoS) rechazar un nuevo servicio a interrumpir uno ya iniciado. Por tanto, las estrategias mostradas en la Tabla 6.11 se construyen en base a tener en cuenta, o no, algunos de los otros tres criterios mencionados. Para ello los pesos correspondientes, actúan como máscara binaria, activando o desactivando el criterio dentro de la función de utilidad global. Las estrategias se pueden agrupar en tres tipos: aquellas que se basan en el precio, los que se centran en el RAT *Affinity*, y los que emplean la combinación de ambos. Dentro de esa clasificación, se estudiará la interacción de esos criterios con el coste de realizar traspasos, entendiendo que es preferible evitar cambiar de elementos de acceso cuando el servicio se encuentre activo. En este sentido, se podrá observar cómo las diferentes combinaciones analizadas dan lugar a rendimientos desiguales, poniendo de relieve la importancia de una adecuada configuración. Considerando lo anterior, la función de utilidad global (u_{ijk}), definida en la Ecuación (4.8), puede expresarse como sigue:

$$u_{ijk} = \omega_{co} \cdot \alpha_{ijk} + \omega_{ho} \cdot \beta_{ijk} + \omega_{pr} \cdot \gamma_{ijk} + \omega_{ra} \cdot \delta_{ijk} \quad (6.11)$$

En aquellas estrategias en las cuales no se hace uso de un determinado criterio, su peso correspondiente toma un valor igual a 0.0. Por otra parte, como parámetros de diseño se ha fijado $\lambda = \nu = 0.8$, correspondientes a los criterios de conectividad (Ecuación (4.11)) y RAT *Affinity* (Ecuación (4.15)), respectivamente; mientras que el valor del parámetro μ , correspondiente al criterio de traspaso (Ecuación (4.13)), se discute a continuación.

Para determinar el valor de μ , se estudia la relación que existe entre los criterios de traspaso y precio. Para ello se desactiva el criterio RAT *affinity* (usando $\omega_{ra} = 0$), comparando las utilidades que ofrecen dos alternativas de acceso para un servicio en curso, de manera similar a como se realizó en el análisis del escenario MC-02. Como el criterio α_{ijk} es igual para

Tabla 6.11: Estrategias utilizadas en el escenario OG-02

	Precio		RAT affinity		Combinación	
	HO	No HO	HO	No HO	HO	No HO
Conectividad (ω_{co})	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Traspaso (ω_{ho})	✓		✓		✓	
Precio (ω_{pr})	✓	✓			✓	✓
RAT Affinity (ω_{ra})			✓	✓	✓	✓

ambas alternativas, no se considerará en este análisis; además, para evitar que alguno de los dos criterios tenga una influencia predominante sobre la utilidad global, se fijan los pesos correspondientes al mismo valor ω . Por una parte, se asume que el usuario está conectado a una alternativa de acceso (AE_a), pagando un precio p_a , mientras que otro elemento de acceso (AE_b) ofrece un precio más barato, un $100 \cdot \xi$ % más bajo que p_a ($p_b = (1 - \xi) p_a$, con $\xi < 1$). En la situación límite, se igualan las utilidades de ambas alternativas de acceso, por lo que se deduce:

$$\begin{aligned}
u_a &= u_b \\
\omega \cdot \beta_{ijk}^a + \omega \cdot \gamma_{ijk}^a &= \omega \cdot \beta_{ijk}^b + \omega \cdot \gamma_{ijk}^b \\
(1) + (-\log(p_a)) &= (1 - \mu) + (-\log(p_a(1 - \xi))) \\
\mu &= -\log(1 - \xi)
\end{aligned} \tag{6.12}$$

Si se establece el 20 % como la variación del precio para la que un usuario estaría dispuesto a cambiar de AE, el valor del parámetro μ es de ≈ 0.1 .

Con el objetivo de evaluar el rendimiento de las estrategias definidas previamente, para ambos tipos de servicio (voz y datos), se han analizado las siguientes figuras de mérito:

- **Tasa de éxito - *Success Rate* (SR).** Probabilidad de que un servicio finalice con éxito, es decir, que no sea rechazado ni interrumpido.
- **Traspasos - *HandOvers* (HO).** Número medio de trasposos que se llevan a cabo durante un servicio.
- **Precio por Servicio (PS).** Precio medio pagado por unidad de tiempo y de tráfico.
- **RAT *Affinity* (RA).** Indica el porcentaje del tiempo que un servicio ha usado la tecnología por la que tiene afinidad.

6.4.2. Resultados de la simulación

En primer lugar, la Figura 6.17 muestra la probabilidad de finalizar un servicio con éxito; las líneas continuas se corresponden con el servicio de voz y las discontinuas con el de datos. Aunque, en general, todas las estrategias presentan una buena tasa de éxito en los servicios cursados (alrededor del 90 %), se puede observar que existen ligeras diferencias dependiendo del tipo de servicio. El servicio de voz presenta una menor tasa de éxito cuando se utiliza la estrategia basada en el precio frente a las otras estrategias, siendo ésta más relevante cuando

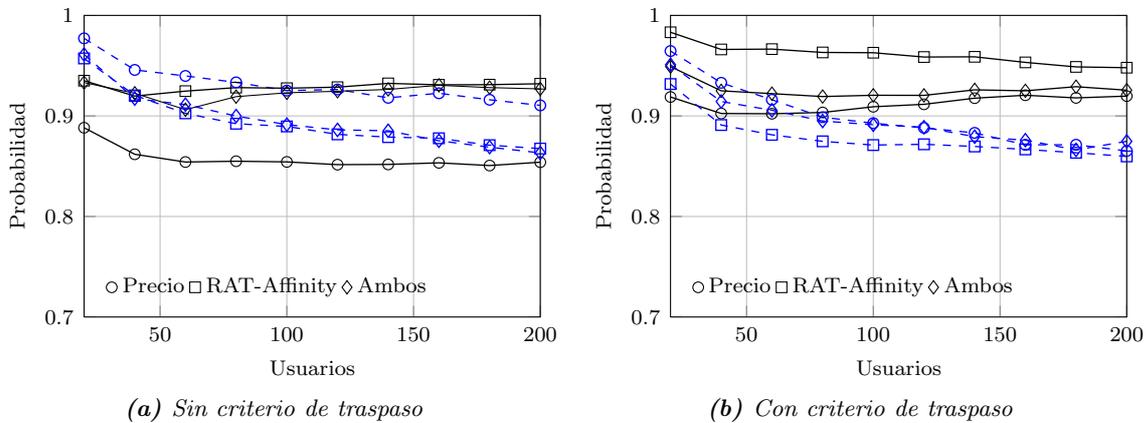


Figura 6.17: Probabilidad de finalización de servicios con éxito Vs. número de usuarios. Las líneas continuas se corresponden con el servicio de voz y las discontinuas con el de datos

no se considera el criterio de traspaso. Por su parte los servicios de datos muestran una leve tendencia a disminuir su tasa de éxito conforme se incrementa el número de usuarios. Un aspecto a destacar es que, de no haberse considerado la capacidad del servicio en el criterio de conectividad (α_{ijk}), la tasa de éxito del servicio de datos hubiera sido mucho menor, ya que el servicio de voz hubiese recibido una mayor utilidad.

Sin embargo, el impacto del criterio de traspaso queda patente con mayor relevancia en la Figura 6.18. De manera similar a las figuras anteriores, las líneas continuas se corresponden con el servicio de voz y las discontinuas con el de datos. Se puede observar una notable reducción del número de traspasos (particularmente para el servicio de voz) cuando se considera el criterio correspondiente (β_{ijk}) en la estrategia. El impacto es menos relevante para el servicio de datos, especialmente con un número elevado de usuarios, ya que la red se encuentra fuertemente cargada (esto es más evidente para la estación base celular) y, por consiguiente, no existen muchas alternativas de conexión. Por otro lado, cuando $\omega_{ho} = 0$, es decir, el coste de cambiar de AE no influye, se observa que las estrategias que consideran el RAT *affinity* reducen el número de traspasos para el servicio de datos, pero no para el servicio de voz. Esto es debido al efecto rebote que afecta a los flujos del servicio de voz, ya que un doble cambio de acceso no tiene ningún efecto en la utilidad global.

En lo que se refiere al precio que un usuario necesita pagar por servicio ($MU/(segundos \cdot TU)$), la Figura 6.19 muestra un resultado interesante. Para el servicio de voz se observa el comportamiento esperado, ya que la estrategia que tiene en cuenta el precio abarata el servicio, comparado con la que tiene en cuenta el RAT *affinity*. Sin embargo, para el servicio de datos se ve que, precisamente, es la estrategia que tiene en cuenta el RAT *affinity* la que da lugar a los precios más bajos, incluso por debajo de los ofrecidos por las estrategias que favorecen el precio. Se debe tener en cuenta que la optimización es global, por lo que busca abaratar el conjunto de los servicios en el escenario y no cada uno de ellos. La razón es que los puntos de acceso *WiFi* (debido a su cobertura) se encuentran menos cargados que la estación celular y, por lo tanto, el precio que ofrecen es menor. Como los servicios de voz tratan de conectarse a la estación base (sin importar la tarifa que ofrece) de acuerdo a su RAT *affinity*, los precios ofrecidos por los puntos de acceso *WiFi* se mantienen bajos, reduciendo por tanto el precio para el servicio de datos. Por otro lado, los resultados también reflejan

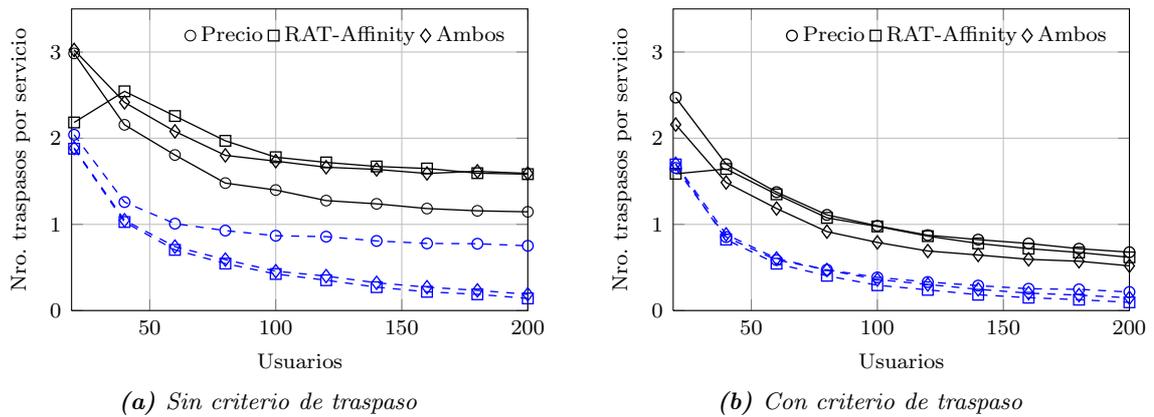


Figura 6.18: Número medio de traspasos por servicio Vs. número de usuarios. Las líneas continuas se corresponden con el servicio de voz y las discontinuas con el de datos

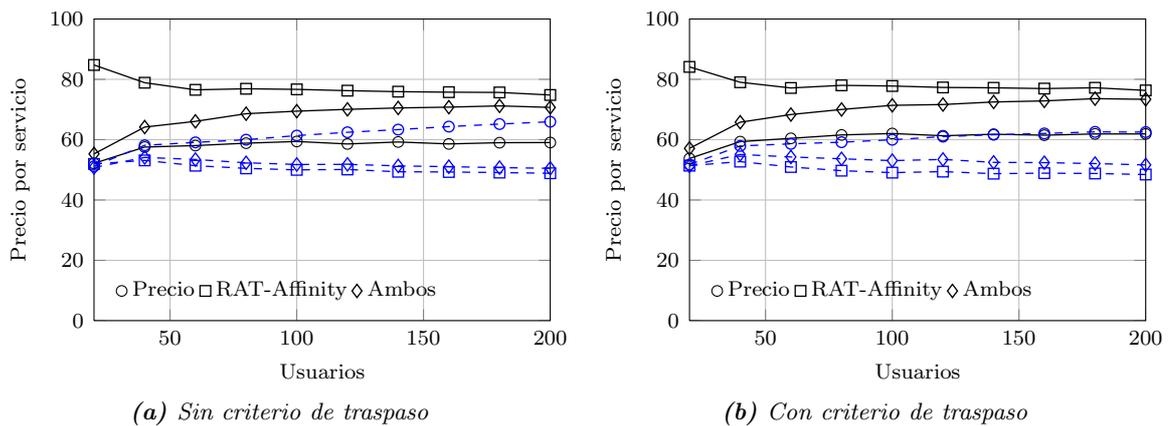


Figura 6.19: Precio medio por servicio Vs. número de usuarios. Las líneas continuas se corresponden con el servicio de voz y las discontinuas con el de datos

que las estrategias basadas en precio no distinguen entre los dos tipos de servicio, por lo que ambos tienden a pagar lo mismo. Por último, cabe destacar que no se observa una clara dependencia del criterio de traspaso en lo relativo al precio, ya que no hay gran diferencia entre los resultados de las estrategias que consideran o no dicho criterio.

La Figura 6.20 muestra el porcentaje de tiempo que un servicio se encuentra asociado a una tecnología con la que tiene afinidad. Se puede afirmar que el uso de una estrategia apropiada tiene una gran influencia en este aspecto, ya que los valores obtenidos para aquella basada en el RAT *affinity* son mucho mayores que aquellos que presenta la estrategia basada en el precio. Aunque los valores obtenidos para los servicios de voz no se ven claramente influenciados por el incremento del número de usuarios, este efecto si se observa en los servicios de datos, que presentan un notable aumento del tiempo que están conectados a su tecnología afín, en particular en aquellas estrategias que se basan en el RAT *affinity*. Finalmente, se puede observar que, en general, el criterio de traspaso no influye de forma relevante en el tiempo de uso de la tecnología afín.

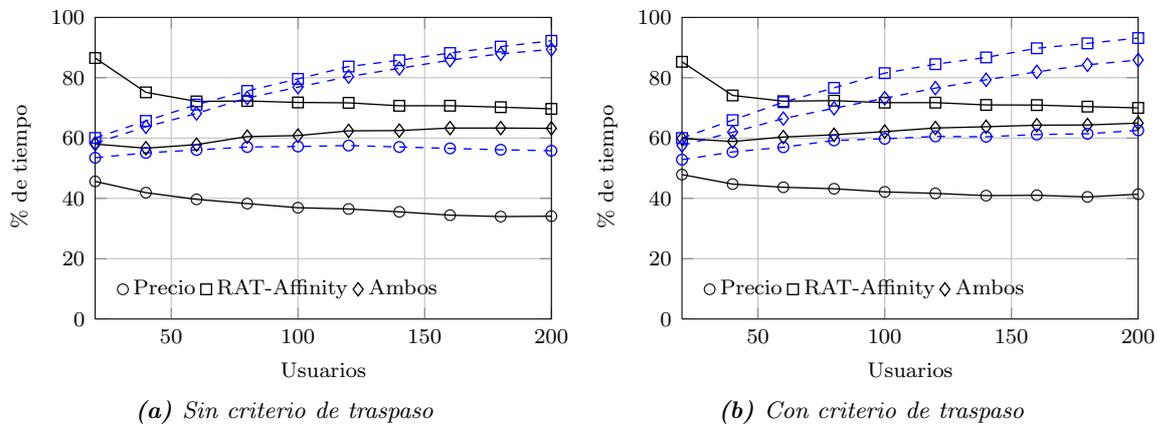


Figura 6.20: RAT affinity medio por servicio Vs. número de usuarios. Las líneas continuas se corresponden con el servicio de voz y las discontinuas con el de datos

A fin de obtener una visión más global del comportamiento de las diferentes estrategias, la Figura 6.21 hacen uso de diagramas *cobweb* en los que se representa las cuatro figuras de mérito para ambos tipos de servicio. La línea discontinua (azul) representa la estrategia ligada al RAT *affinity*, la línea discontinua con viñetas (rojo) corresponde al precio, mientras que la línea continua simboliza aquella que combina ambos criterios. Los bordes de los ejes representan el mejor resultado que se puede obtener, mientras que el centro establece el peor caso (los límites del número de traspasos se han establecido empíricamente). En este caso el análisis se ha realizado para el escenario con 200 usuarios. En general, todos los resultados indican que la estrategia que tiene en cuenta tanto el precio como el RAT *affinity* presenta un rendimiento similar al obtenido con la que únicamente considera el RAT *affinity*; esto implica que la estrategia que involucra ambos criterios no incrementa el rendimiento de manera relevante, produciéndose incluso una ligera disminución en algunas figuras de mérito. Por el contrario, cuando se hace uso del criterio de traspaso, se puede ver una notable mejora en las figuras de mérito relacionadas con dicho criterio (HO_{datos} y HO_{voz}), siendo aún más relevante para el servicio de voz en aquellas estrategias que incorporan el criterio de RAT *affinity*.

Si bien la comparativa de las tres estrategias, en una misma figura, ayuda a mostrar gráficamente cuál es la que ofrece mejor rendimiento, posiblemente sea un poco difícil observar la mejora en el rendimiento ofrecido, de forma individual, por cada una de ellas, comparando sus correspondientes resultados con respecto al uso o no del criterio de traspaso. Con este fin, la Figura 6.22 muestra los resultados de la estrategia de precio y el impacto que produce el criterio de traspaso en el rendimiento; mostrándose únicamente la gráfica de dicha estrategia debido a que las otras no muestran una mejora relevante en el rendimiento. Como se puede ver, el hacer uso del criterio de traspaso produce una notable mejora en la mayoría de figuras de mérito, sobretodo en aquellas que guardan relación con el RAT *affinity* y el traspaso.

6.4.3. Discusión

En este escenario se ha propuesto, una vez más, el uso de técnicas de programación lineal con el objetivo de estudiar el mejor rendimiento en entornos de acceso altamente heterogéneos.

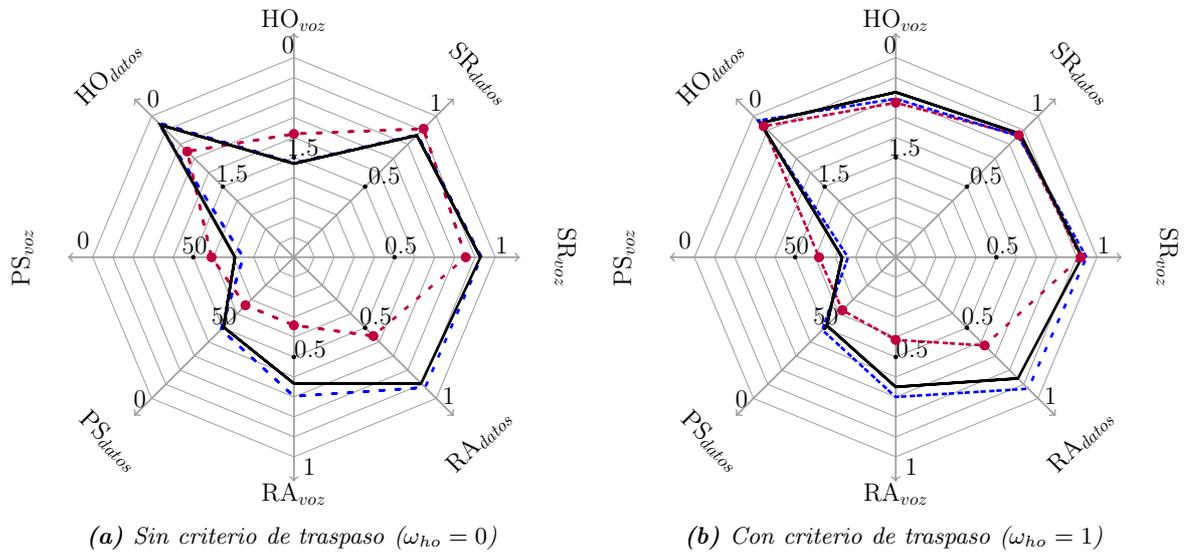


Figura 6.21: Rendimiento de las diferentes estrategias de OG-02. La línea discontinua representa la estrategia ligada al RAT affinity (azul), la discontinua con viñetas corresponde al precio (rojo), la continua simboliza la que combina ambos criterios

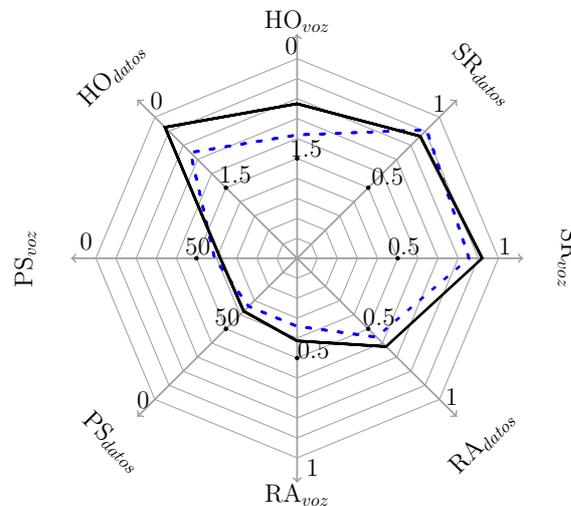


Figura 6.22: Estrategia basada en el precio. La línea continua incluye el criterio de traspaso, mientras que la discontinua no la considera

El marco que se ha desarrollado, que en este caso considera la evolución temporal de los servicios, es lo suficientemente genérico como para extender su uso a diversos escenarios y casos de uso. Se ha evaluado su viabilidad por medio de un despliegue de red concreto, sobre el cual se han estudiado estrategias basadas en el precio, RAT *affinity* y coste de realizar traspasos. Los resultados muestran que una adecuada selección de los criterios podrían llevar a diversos rendimientos, por lo que debe ser considerada cuidadosamente al evaluar el rendimiento que se espere de una red. En concreto, los resultados revelan que la integración

del coste de realizar traspasos en las estrategias tiene considerables beneficios, ya que lleva a una mejora notable en términos del número medio de traspasos por servicio, sin perjudicar el resto de figuras de mérito estudiadas, mejorándolas incluso en algunos casos.

6.5. Escenario final: Calidad de servicio diferenciada en base a políticas dinámicas de precios

Mediante los escenarios anteriores se ha mostrado la capacidad de cada herramienta de simulación de forma independiente, logrando alcanzar los objetivos planteados en base a los modelos definidos para cada una de ellas. En este apartado se pretende analizar las ventajas que se presentan al emplear ambas herramientas en el análisis de un mismo caso de uso. Por una parte mCASE ofrecerá la mejor alternativa de acceso para el usuario, mientras que oGASE determinará el rendimiento óptimo que se podría alcanzar. Ambos enfoques, utilizados de forma complementaria, proporcionarán mayor información acerca de la mejor combinación de criterios a utilizar dentro de la función de utilidad global o de los posibles ajustes que se podrían realizar en los principios de diseño adoptados para los parámetros que definen el comportamiento de cada uno de dichos criterios. De los casos de uso anteriores, se puede ver que el precio aparece como un criterio relevante entre todos los utilizados, ya que permite definir políticas dinámicas que pueden favorecer tanto a usuarios como a operadores en función de las estrategias adoptadas en el análisis. Otro criterio importante es el traspaso, que permite al usuario asegurar una determinada calidad del servicio, al evitar la degradación de las conexiones que se pueden producir durante un cambio de alternativa de acceso. En base a ambos criterios se realizará el análisis del escenario final, complementando el estudio al utilizar dos tipos diferentes de usuarios en los experimentos realizados con oGASE.

6.5.1. Descripción del escenario

Con el fin de obtener resultados que muestren claramente el alcance que ofrece cada una de las herramientas de simulación, el análisis se realiza sobre un escenario menos complejo, que comprende cuatro estaciones base de una sola tecnología (imitando un despliegue tradicional de tipo celular), cada una con una capacidad de 16 TU y una cobertura de 600 m. Además, se considera un área cuadrada de 1000 m de lado, en el que las estaciones base se despliegan sin ninguna planificación previa (aunque existe una distancia mínima entre ellas), tal como se muestra en la Figura 6.23.

Los usuarios se despliegan dentro del escenario de forma aleatoria y luego se mueven siguiendo un modelo *Random Waypoint*, con una velocidad aleatoriamente seleccionada dentro del intervalo $[1, 3]$ (m/s), emulando el movimiento típico de un peatón. Se definen dos tipos de usuarios: *business* y *consumer*. La principal diferencia entre ellos es el precio que podrían estar dispuestos a pagar por un servicio. En este sentido, el usuario *business* está dispuesto a pagar más que el usuario *consumer* para acceder a la red. En cuanto a los patrones de tráfico, estos serán generados mediante el modelo *ON-OFF*, en la que los tiempos de actividad y reposo se modelan con variables aleatorias de tipo exponencial negativa, con medias de 60 y 120 segundos, respectivamente. Se asume que la capacidad requerida de los servicios solicitados por los usuarios es igual a 1 TU, por tanto, una llamada concreta de x segundos tendría un coste de $x \cdot p$, donde p es el precio actual (en MU) ofrecido por la estación base seleccionada. Por otra parte, se asume que el usuario *business* no cambia el precio máximo que está dispuesto a pagar, que se fija para todos los casos a 1 MU por TU, mientras que

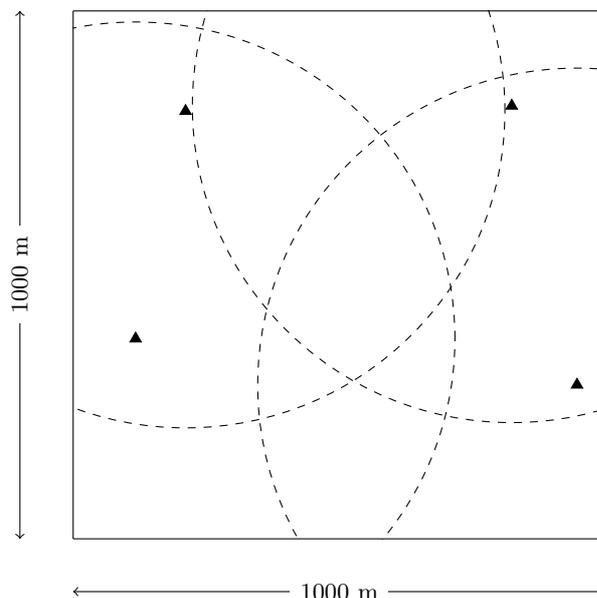


Figura 6.23: Despliegue de red del escenario final

la tarifa máxima que el usuario *consumer* puede aceptar varía durante la simulación, por medio del parámetro φ , definido como la relación entre los precios máximos que los usuarios *consumer* y *business*, respectivamente, están dispuestos a pagar:

$$\varphi = \frac{(p_{\text{máx}})_{\text{consumer}}}{(p_{\text{máx}})_{\text{business}}} \quad (6.13)$$

En base a la ecuación anterior, se definen dos casos, dependiendo del valor asignado a $\varphi = [0.6, 0.8]$, con el objetivo de evaluar el impacto que produce un incremento en la predisposición del usuario *consumer* de pagar más por acceder a la red. Por otra parte, y para fines de comparación, también se va considerar el caso en el que las estaciones base utilizan una política de tarifa plana, con un precio aceptable para ambos tipos de usuarios ($0.5 \cdot (p_{\text{máx}})_{\text{business}}$).

Análisis realizado con mCASE

Para el análisis realizado mediante la herramienta mCASE, se han seleccionado dos criterios, de entre los definidos en la Sección 4.1.4, debido al papel relevante que han desempeñado en los estudios realizados en los escenarios anteriores. Estos criterios son el precio (A_{ij}) y el traspaso (B_{ij}). Por tanto, la función de utilidad agregada (Φ_{ij}), definida en la Ecuación (4.1), puede expresarse como sigue:

$$\Phi_{ij} = \omega_{pr} \cdot A_{ij} + \omega_{ho} \cdot B_{ij} \quad (6.14)$$

Para establecer la relación entre ambos criterios, en este escenario se hace uso del mismo análisis realizado en el escenario MC-02. Haciendo uso de la función del precio de la estación base mostrada en la Figura 6.4, se determina el valor del parámetro σ , correspondiente al criterio de traspaso (Ecuación (4.3)), para evitar que alguno de los dos criterios tengan una influencia predominante dentro de la utilidad global. Nuevamente, asumiendo que un usuario

Tabla 6.12: Estrategias utilizadas en el escenario final

	Perspectiva del operador		Perspectiva del usuario	
	HO	No HO	HO	No HO
Conectividad (ω_{co})	✓	✓	✓	✓
Traspaso (ω_{ho})	✓		✓	
Precio (ω_{pr})			✓	✓
Tipo de usuario (ω_{us})	✓	✓		

cambiará de estación base cuando una nueva alternativa de acceso ofrezca una tarifa con un 20% de descuento (criterio de diseño), se obtiene que $\sigma \approx 0.10$.

Análisis realizado con oGASE

Como se ha dicho antes, para completar el análisis realizado con la herramienta mCASE, se va a comparar el beneficio conseguido con el resultado de un problema de programación lineal binaria que se plantea haciendo uso del mismo escenario. Para ello, se utilizarán como entradas las trazas que mimetizan los patrones de tráfico y de movimiento que fueron empleados por mCASE. Es importante destacar que la solución óptima del problema antes mencionado depende en gran medida, como se verá más adelante, de los objetivos particulares que se persiguen, de acuerdo a lo establecido en la función objetivo correspondiente. En este sentido, se estudiarán dos enfoques complementarios, tal y como se describe a continuación.

- *Perspectiva del Operador.* Si la optimización se lleva a cabo desde el punto de vista del operador, es razonable suponer que el objetivo sería aceptar tantos servicios como sea posible, dando prioridad a los usuarios *business*, para incrementar sus ingresos y, además, con el objetivo secundario de reducir el número de traspasos, a fin de reducir la sobrecarga correspondiente.
- *Perspectiva del Usuario.* Desde el punto de vista del usuario el objetivo principal sería seleccionar el acceso que ofrece la tarifa más baja. También es razonable suponer que podría existir una cierta voluntad de reducir el número de traspasos, para evitar la degradación de la calidad en sus conexiones.

Si bien el marco del proceso de optimización es el mismo para ambas perspectivas, empleando la metodología descrita en la Sección 4.2.3, dependiendo de cómo se construya la función de utilidad global (u_{ijk}), se podrían definir varios objetivos. Para este análisis, se utilizarán 4 de los criterios definidos dentro de la metodología oGASE (Sección 4.2.4): conectividad (α_{ijk}), traspaso (β_{ijk}), precio (γ_{ijk}) y tipo de usuario (ϵ_{ijk}). De manera similar a OG-02, la Tabla 6.12 muestra las estrategias que se utilizarán durante el análisis, en base a utilizar los pesos como máscara binaria, activando o desactivando los criterios correspondientes dentro de la función de utilidad global.

Para el criterio de conectividad, definida en la Ecuación (4.11), el parámetro c_k es igual a 1.0, ya que en este análisis todos los servicios tienen la misma capacidad (1 TU), mientras que al parámetro λ se le asigna un valor de 0.6 como principio de diseño. El criterio de traspaso cuenta con el parámetro μ (Ecuación (4.13)), al que se le asigna, también como decisión de diseño, el valor de 0.2. Con respecto al parámetro ξ , correspondiente al tipo de usuario (Ecuación (4.16)), se le asigna el valor de 0.6.

Comparando los criterios utilizados para este análisis, en las funciones de utilidad global correspondientes a las herramientas de mCASE (Φ_{ij}) y oGASE (u_{ijk}), se podría llegar a la conclusión de que, en el caso de oGASE, se estarían utilizando criterios adicionales (conectividad y tipo de usuario), que no se tienen en cuenta en mCASE. En primer lugar, el criterio de conectividad representa el concepto inherente de todo sistema de comunicaciones, que viene embebida *per se* en la metodología de mCASE, por lo que no es necesario incorporarlo explícitamente en dicha herramienta. Con respecto al tipo de usuario, este criterio no puede ser aplicado en mCASE, ya que la naturaleza propia de esta metodología lo impide. Se debe tener en cuenta que mCASE presenta un enfoque local, en tanto en cuanto esta circunscrito a la información correspondiente a un usuario específico, en un instante de tiempo determinado; debido a ello, mCASE no puede considerar, dentro de su función de utilidad global, ninguna información relacionada con el resto de usuarios. Por el contrario oGASE, cuando analiza cada fotografía, lo hace en base a todos los usuarios y elementos de acceso involucrados en el escenario. Esta característica global le permite tener en cuenta a qué tipo pertenece cada usuario a la hora de calcular el valor de la utilidad global. El objetivo de incluir el criterio de tipo de usuario, es que la herramienta oGASE pueda proporcionar mayor información acerca de la influencia del hecho de que ciertos usuarios estén dispuestos a pagar más por tener una cierta preferencia a la hora de acceder a los elementos de acceso. En todo caso, se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos por mCASE se basan en criterios similares a los utilizados en la estrategia de oGASE catalogada como **perspectiva del usuario**, por lo que a la hora de realizar la comparativa entre ambas herramientas únicamente se utilizará los resultados de dicha estrategia.

6.5.2. Resultados de la simulación

Con respecto al análisis realizado con mCASE, la simulación dura 3600 segundos, y se llevan a cabo 100 ejecuciones independientes para cada estrategia, a fin de garantizar la validez estadística de los resultados. En el caso de oGASE, se analizan para cada estrategia 10 simulaciones de forma independiente, para asegurar también la validez de los resultados. Puesto que las trazas se obtienen tomando fotografías cada 10 segundos (procedentes de la simulación realizada con mCASE), una ejecución de oGASE (correspondiente a una simulación de mCASE) implica la resolución de 360 problemas de optimización, y el valor medio que se representa en las figuras de rendimiento se basa en la solución de 3600 problemas diferentes. Por otra parte, durante los diversos experimentos se varía tanto el número de usuarios como el parámetro φ , mientras se mantiene el mismo porcentaje de usuarios *business* (30%).

Con el fin de proporcionar una descripción más completa del comportamiento alcanzado con el escenario propuesto (usando los dos enfoques, mCASE y oGASE), se propone el uso de figuras de mérito específicas, que permitan una mejor comprensión del rendimiento de los mecanismos analizados; tal como se definen en la Tabla 6.13. Para compararlos de manera ecuánime en ambos tipos de análisis, también se proporciona el rango de valores que establece los mejores y peores casos; algunos de ellos se basan en la definición *per se* de la figura de mérito, mientras que otros se encuentran empíricamente, en base a los valores que se observaron durante los experimentos que se llevaron a cabo.

Tabla 6.13: Figuras de mérito para evaluar el rendimiento del escenario final

	Peor	Mejor	
Traspaso <i>HandOver</i> (HO)	3	0	Indica el número medio de traspasos que se realizan durante un único servicio. Se estudiará tanto para los clientes <i>business</i> como para los <i>consumer</i> , HO_{bus} y HO_{cons} respectivamente. El rango de valores ha sido seleccionado de acuerdo a los resultados obtenidos durante el análisis, en los que el máximo valor observado nunca excedió de 3 traspasos por servicio.
Tasa de éxito <i>Success Rate</i> (SR)	0	1	Permite analizar la probabilidad de que un servicio finalice con éxito. Se obtiene como el cociente de los servicios finalizados con éxito y el número total de servicios iniciados. No se tienen en cuenta, por tanto, aquellos que son rechazados (<i>rejected</i>) o interrumpidos (<i>dropped</i>). Esta figura de mérito también se estudiará en base a los clientes <i>business</i> y <i>consumer</i> , SR_{bus} y SR_{cons} , respectivamente.
Precio por Servicio (PS)	100	0	Se define como el precio medio que un usuario paga por servicio y unidad de tiempo, y está limitada por el precio más alto ofrecido por las estaciones base. Los resultados también se estudian para los dos tipos de usuarios que se consideran en el análisis: PS_{bus} y PS_{cons} .
Factor de Carga <i>Load factor</i> (LF)	10	0	<p>Uno de los objetivos de las políticas de precios que se han introducido anteriormente era fomentar el balanceo de carga. Para evaluar este aspecto se introduce la figura de mérito LF, que considera la diferencia media de la carga instantánea (número actual de servicios activos) de cada estación base (L_j) con la carga media que soportaría cada de ellas, si toda las estaciones base soportaran las misma carga (m).</p> $LF = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N \ L_j - m\ $ <p>A la vista de los resultados observados, se puede garantizar que el peor de los casos (LF = 10) no se alcanza nunca. Como esta figura de mérito únicamente afecta a la operación de la red, no depende del tipo de usuario.</p>

	Peor	Mejor	
Beneficio de la red <i>Network Revenue</i> (NR)	0	60	También se ha estudiado el beneficio económico obtenido por cada estación base, definiendo para ello la figura de mérito NR como el ingreso medio por unidad de capacidad y tiempo. En este caso tampoco se depende del tipo de usuario y, de acuerdo a los valores que se observaron empíricamente, se puede asegurar que no supera 60 en el escenario analizado.

Sensibilidad del factor de descuento

De acuerdo al estudio previo realizado para el caso de mCASE, la relación existente entre los criterios de precio y traspaso permiten determinar el valor del parámetro σ , correspondiente al traspaso, en base al principio de diseño asumido para el porcentaje de descuento $\chi = 0.20$. Para comprender mejor la influencia del parámetro χ sobre el comportamiento de la función de utilidad global de mCASE (Φ_{ij}), antes de efectuar un análisis en profundidad del rendimiento ofrecido por el escenario, se realiza un primer conjunto de simulaciones, incrementando χ de 0.01 a 0.50, modificando σ de acuerdo a la ecuación $\sigma = -\log(1 - \chi)$. Se realizaron 100 ejecuciones independientes de mCASE por cada valor de χ , y se obtuvo el número medio de traspasos, así como el precio medio por servicio.

Los resultados de este estudio en particular, en el que se consideran 150 usuarios, se recogen en la Figura 6.24, donde las líneas continuas representan el rendimiento para los usuarios *business* y las discontinuas el de los *consumer*. Como se puede ver en la Figura 6.24a, el número de traspasos se mantiene bastante estable, siendo ligeramente superior para el usuario *business*, hasta que χ es 0.10. A partir de ese valor, el número de traspasos disminuye, hasta alcanzar el mínimo, que queda establecido al aplicar la política de precios estáticos. En general, se observa que para bajos porcentajes de descuento se produce un mayor número de traspasos debido a que el usuario encuentra más alternativas de acceso que cumplan con dicho descuento, por lo que es mayor la posibilidad de cambiarse de estación base. Conforme el valor de χ se incrementa, dicha posibilidad de ve disminuida ya que son menos las estaciones base que cumplan con un requisito tan exigente (cuanto más cargada se encuentre mayor será el precio ofrecido y, por tanto, menor el porcentaje de descuento). Para valores altos de χ , es la pérdida de conectividad el único motivo por el cual se llevaría a cabo un traspaso. Por tanto, se confirma que el valor asignado a $\chi = 0.20$, realizado en el análisis anterior, es un criterio de diseño correcto, ya que representa un valor de equilibrio entre los dos conjuntos de valores extremos obtenidos en este experimento para el número de traspasos por servicio.

Por otro lado, la Figura 6.24b muestra que el precio medio por servicio no depende del valor que se asigne al parámetro de descuento, ya que se mantiene prácticamente constante para todo $\chi \in [1, 50]$. También se puede ver que, como cabría esperar, los usuarios *business* pagan más que los *consumer*, aunque la diferencia es menos relevante cuando φ es 0.8. Además, se pone de manifiesto que no existe ninguna diferencia cuando las estaciones base están utilizando la política de tarifa plana.

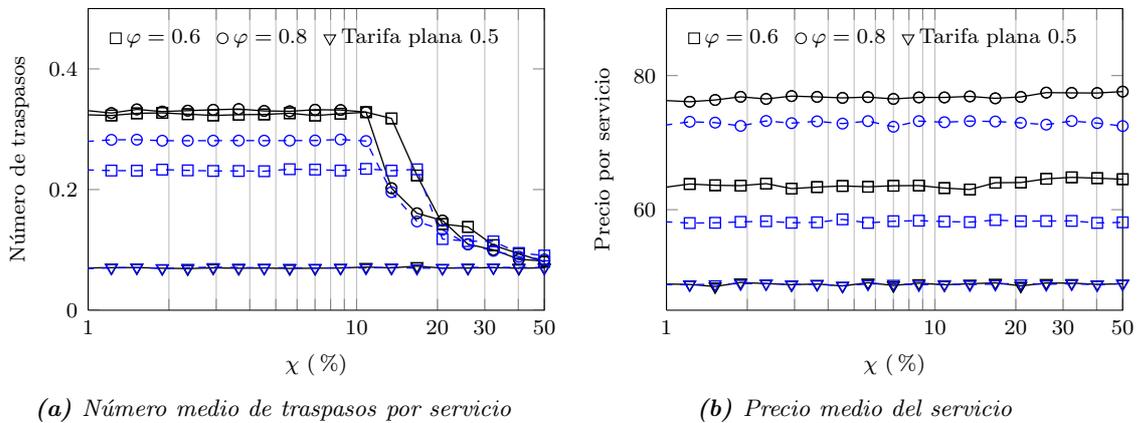


Figura 6.24: Impacto del parámetro de descuento (χ) en el escenario analizado por mCASE. Las líneas continuas representan el rendimiento para los usuarios **business** y las discontinuas el de los **consumer** (azul)

Impacto del número de usuarios

Para evaluar el grado de influencia que tiene este parámetro sobre el escenario, se incrementa el número de usuarios de 25 a 250, manteniendo el mismo porcentaje de usuarios *business* (30%), y se representa el precio medio, así como el número medio de traspasos por servicio, tal como se muestra en las Figuras 6.25 y 6.26, respectivamente. En las figuras correspondientes a oGASE, los marcadores sólidos identifican los resultados de las estrategias que hacen uso del criterio de traspaso, mientras que las viñetas en blanco se corresponden con aquellos producidos por las estrategias que no hacen uso de dicho criterio. Para ambos conjuntos de figuras, las líneas continuas son los resultados observados para los usuarios *business*, mientras que las líneas discontinuas identifican los obtenidos para los *consumer*.

Tal como se describió anteriormente, los resultados de mCASE deberían ser comparados con los obtenidos por oGASE desde la perspectiva del usuario (Figuras 6.25b y 6.26b), ya que estos también tienen como objetivo minimizar el precio pagado por servicio. En este sentido, focalizando el estudio en los resultados correspondientes al traspaso (Figuras 6.26c y 6.26b) se puede ver que la función de utilidad de mCASE es muy eficaz, ya que se obtienen valores que son incluso más bajos de los obtenidos con oGASE. Se debe tener en cuenta que el proceso de optimización embebido en oGASE trabaja con la combinación de todos los criterios involucrados en el análisis y, por lo tanto, los resultados de determinados parámetros, analizados de forma independiente, puede que sean inferiores a los obtenidos por mCASE. Esto se corrobora al centrar el análisis en los resultados correspondientes al precio medio por servicio (Figuras 6.25c y 6.25b). En este caso, el precio que el usuario tendría que pagar por el servicio (analizado con mCASE) es notablemente mayor que el obtenido con oGASE. Esto es debido a que el proceso de optimización sacrifica el rendimiento respecto a los traspasos, para buscar un rendimiento global óptimo, derivando en un precio menor por servicio.

Cambiando el enfoque del análisis hacia los resultados obtenidos únicamente por la herramienta oGASE, se puede ver claramente el efecto de incluir el criterio de traspaso en la función de utilidad. El número de traspasos se reduce en gran medida para todas las políticas de precios, y tipos de usuarios, considerados en el análisis. En el caso de los resultados obtenidos desde la perspectiva del operador son tan bajos como los observados para la tarifa plana,

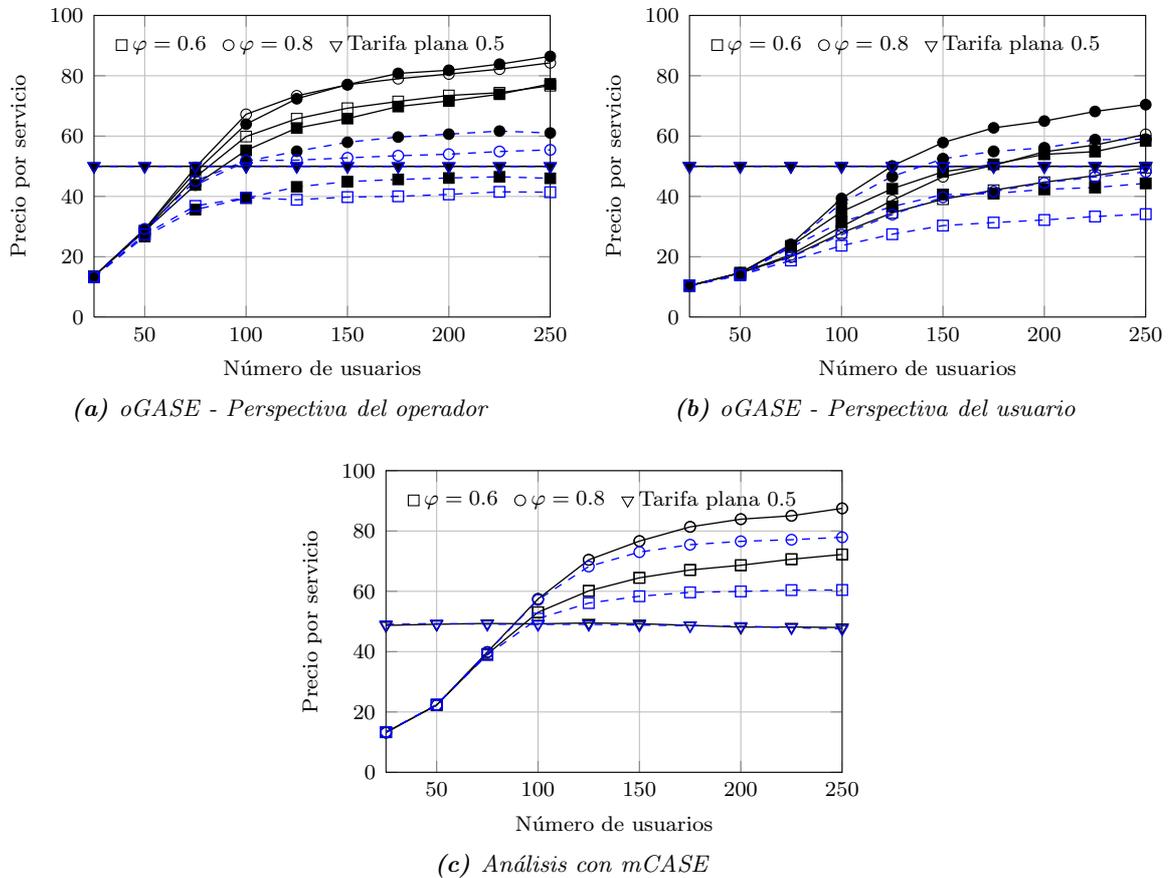


Figura 6.25: Precio medio por servicio para los diversos esquemas analizados. Los marcadores sólidos identifican las estrategias que incluyen el criterio de traspaso y las viñetas en blanco señalan las que no hacen uso de dicho criterio. Las líneas continuas corresponden a los usuarios *business*, mientras que las líneas discontinuas identifican aquellos obtenidos para los *consumer*

que puede ser visto como el mejor resultado que se puede alcanzar, tal como se puede ver en las Figuras 6.26a y 6.26b. Desde la perspectiva del usuario, el traspaso también tiene un gran impacto en el precio del servicio. En la Figura 6.25b, se puede ver que el aplicar ese criterio conlleva a que ambos tipos de usuarios tengan que pagar precios más altos por servicio; así, si los usuarios desean una mejor calidad de servicio (evitar en lo posible el traspaso), tendrían que estar dispuestos a pagar más por servicio. Con respecto a la perspectiva del operador, los precios son ligeramente más altos para los usuarios *consumer* cuando se les aplica el criterio de traspaso, mientras que los usuarios *business* no se ven prácticamente afectados por la aplicación de dicho criterio, ya que se observa que pagan aproximadamente el mismo precio por servicio (Figura 6.25a), debido a que la disponibilidad del usuario a pagar más compensa el efecto que pueda producir el traspaso. Por otra parte, comparando ambas perspectivas en su conjunto, se observa que los precios por servicio obtenidos desde la perspectiva del usuario (Figura 6.25b) son menores a los observados para la perspectiva del operador (Figura 6.25a). Esta diferencia se debe al hecho de que el criterio de precio (γ_{ijk}) no se consideró en la función

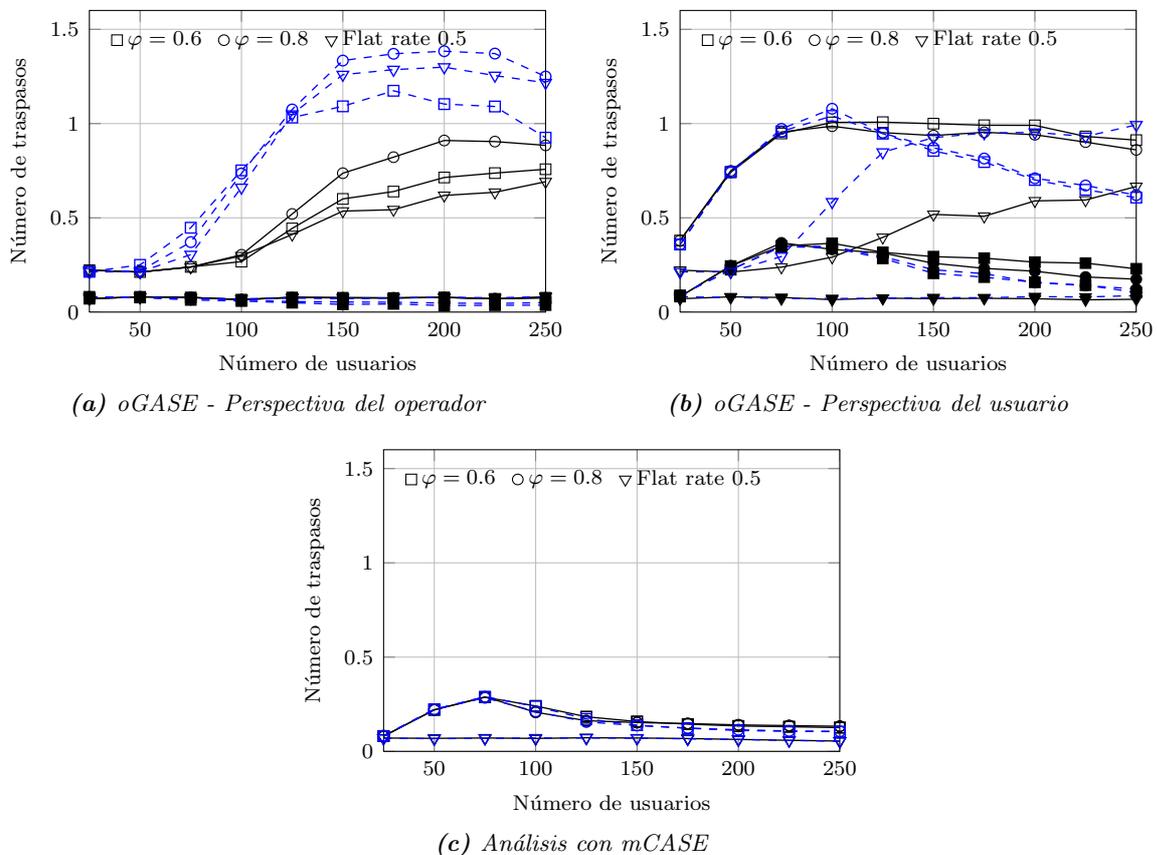


Figura 6.26: Número medio de traspasos por servicio para los diversos esquemas analizados. Los marcadores sólidos identifican las estrategias que incluyen el criterio de traspaso y las viñetas en blanco señalan las que no hacen uso de dicho criterio. Las líneas continuas corresponden a los usuarios *business*, mientras que las líneas discontinuas identifican aquellos obtenidos para los *consumer*

de utilidad correspondiente para la optimización desde la perspectiva del operador, mientras que sí se tuvo en cuenta en la estrategia centrada en el usuario (ver Tabla 6.12).

La Figura 6.26 muestra además otro comportamiento interesante. Se observa que existe un cambio de tendencia en el número medio de traspasos que se realizan en los servicios utilizados por los usuarios *consumer*. Inicialmente los traspasos por servicio se incrementan a medida que hay más usuarios en el escenario, pero a partir de un cierto valor la tendencia cambia. Al aumentar el número de usuarios y, por tanto, el tráfico, la carga de las estaciones base es mayor lo que, al utilizar las políticas de precios que se introdujeron antes, las obliga a fijar precios más altos por usar sus recursos, lo que en cierta medida podría impedir que algunos usuarios *consumer* puedan acceder a determinadas redes.

Análisis del rendimiento general del escenario

Finalmente, las Figuras 6.27 y 6.28 tienen como objetivo representar de manera gráfica el rendimiento general obtenido por las dos herramientas de simulación aplicadas sobre el mismo escenario, con el fin de determinar el alcance de cada una de ellas, de acuerdo a las

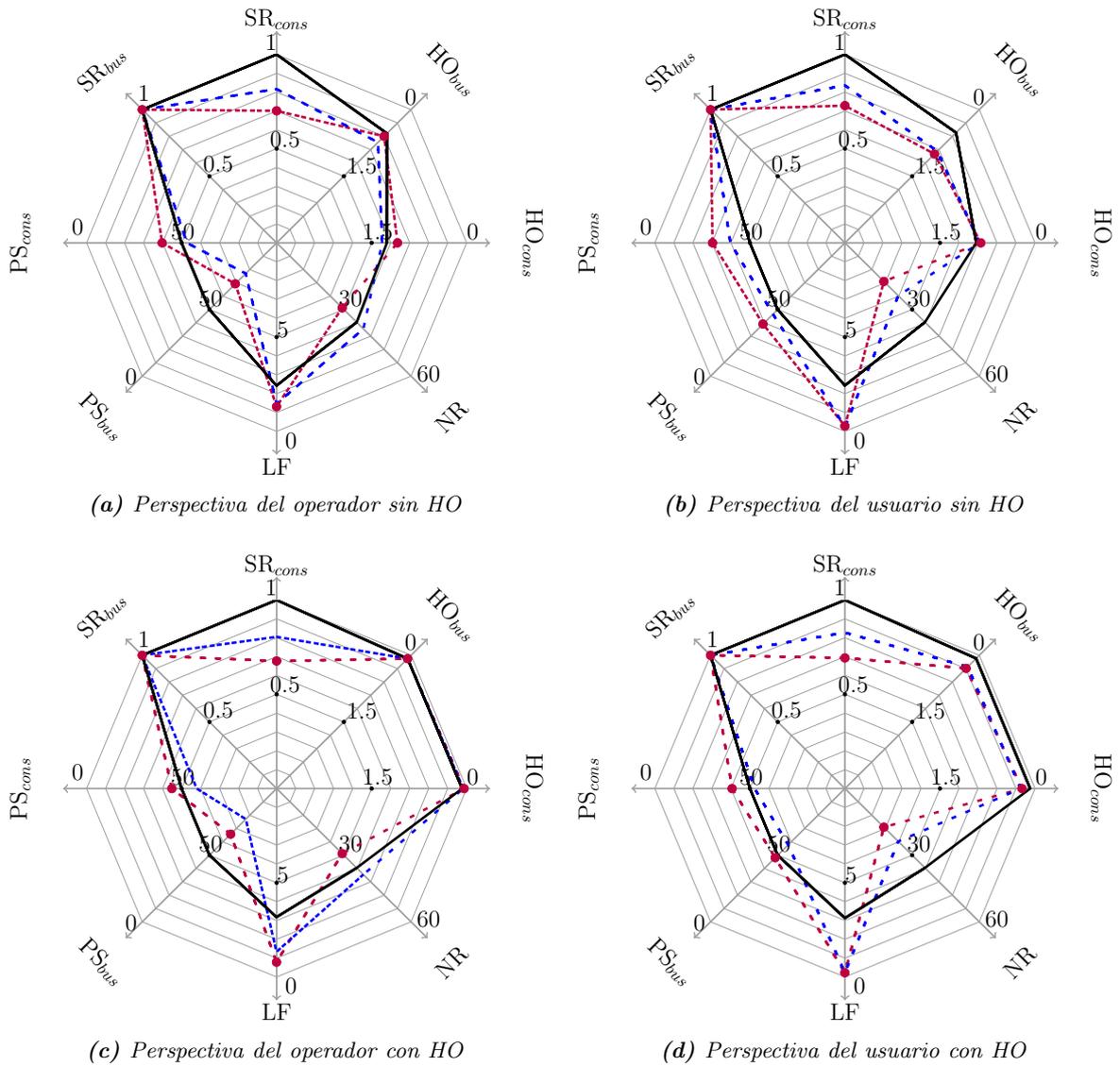


Figura 6.27: Rendimiento general de oGASE para los diversos esquemas analizados. La línea continua es para la tarifa plana, la línea de puntos (rojo) fue obtenido con una política de precios de $\varphi = 0.6$, y las líneas discontinuas (azul) representan los resultados cuando $\varphi = 0.8$

figuras de mérito definidas previamente en la Tabla 6.13. Las correspondientes figuras de tipo *cobweb* usan los límites que se indicaron en dicha tabla, y siendo el mejor comportamiento aquel que se sitúa en el extremo exterior de cada eje; cuanto más abierta sea la curva, mejor sería el rendimiento que representa. Se analiza el comportamiento observado para las dos perspectivas de optimización, con y sin el criterio de traspaso; por parte de mCASE, se utilizan dos configuraciones particulares, correspondientes a dos valores para el factor de descuento χ , 10% y 20%, con el objetivo de evaluar el impacto que tiene sobre su rendimiento.

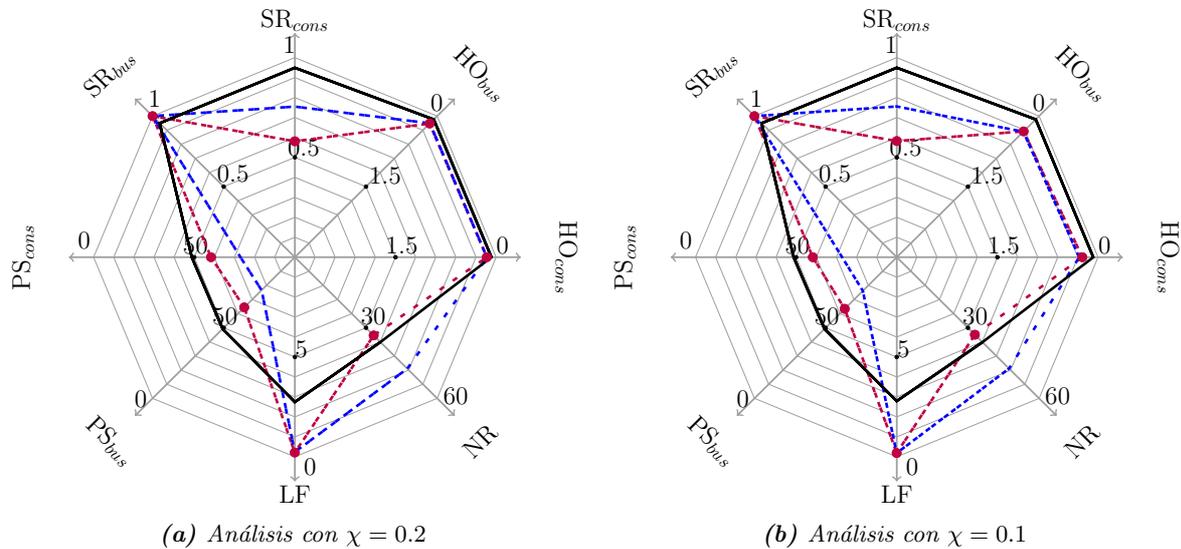


Figura 6.28: Rendimiento general de mCASE para los diversos esquemas analizados. La línea continua es para la tarifa plana, la línea de puntos (rojo) fue obtenido con una política de precios de $\varphi = 0.6$, y las líneas discontinuas (azul) representan los resultados cuando $\varphi = 0.8$

Una primera conclusión que se puede extraer es que la optimización basada en la perspectiva del operador ofrece un rendimiento peor que aquella centrada en la perspectiva del usuario, particularmente en lo que se refiere a los parámetros de traspaso (HO) y precio del servicio (PS). Muy probablemente esto se deba a que la política del operador prioriza en gran medida el rendimiento de los usuarios *business* y, por lo tanto, pone en peligro el beneficio que puedan ofrecer los demás parámetros. También se puede ver que el rendimiento obtenido con la herramienta mCASE (Figura 6.28) ligeramente es superior a la correspondiente optimización basada en la perspectiva del usuario (Figuras 6.27b y 6.27d), especialmente con respecto a los parámetros de traspaso (HO) y beneficio de la red (NR). Algo que se puede observar en esta última comparativa es que ambas estrategias (oGASE desde la perspectiva del usuario y mCASE), presentan el mejor rendimiento posible con respecto al factor de carga (LF), debido a que el precio se tiene en cuenta en ambas, lo que permite realizar un cierto balanceo de carga de la red. Por otro lado, las Figuras 6.28a y 6.28b ponen de manifiesto la escasa influencia del parámetro χ sobre la política de selección de acceso analizada con mCASE, actuando únicamente sobre el número de traspasos.

Como también se ha visto antes, es importante destacar la relevancia de una adecuada selección de los criterios involucrados en la función de utilidad de la metodología basada en la optimización (oGASE). Para los dos perspectivas propuestas (operador y usuario), se puede ver que añadir el **coste del cambio de estación base** mejora en gran medida el rendimiento en relación con el número de traspasos, pero, además, no produce impacto negativo alguno en el resto de parámetros.

Otro aspecto interesante a destacar es que se puede ver (para los tres enfoques) que la política de precios propuesta garantiza un alto grado de balanceo de carga, al contrario de la tarifa plana, ya que en todos los casos el parámetro de factor de carga (LF) se comporta peor

para esta política. Esto demuestra que se logra conseguir la funcionalidad buscada al establecer dicha política. También se observa (Figuras 6.27a y 6.27c), que la optimización basada en el operador ofrece un rendimiento ligeramente inferior con respecto a este parámetro. Este resultado es razonable, ya que el balanceo de carga se consigue por medio de las políticas de precios, y, si los usuarios no consideran el precio para decidir el elemento de acceso con el que están dispuestos a conectarse, entonces no existe ningún mecanismo para balancear la carga entre las distintas estaciones base, como es el caso de esta estrategia de optimización en particular, que no incluye los precios dentro de su función de utilidad (ver Tabla 6.12).

6.5.3. Discusión

En el presente estudio se ha visto, principalmente, la gran influencia que tiene la selección de los criterios involucrados en la función de utilidad global, ya que se puede reflejar comportamientos muy diferentes, dependiendo de los parámetros que se incentiven. En cualquier caso, se puede decir que el rendimiento del sistema basado en la metodología mCASE es bastante aceptable, comparándolo con los resultados que fueron evaluados por la metodología que hace uso de las técnicas de optimización. Los dos enfoques complementarios que se han utilizado en los escenarios analizados en este apartado tienen un alto grado de flexibilidad, abriendo así un significativo número de aspectos que podrían ser abordados en el futuro.

Conclusiones y Líneas Futuras

Ante la, cada vez más, notable heterogeneidad de las redes móviles e inalámbricas, junto con la creciente demanda de recursos por parte de los servicios, los procesos de selección de acceso han tomado un papel más relevante a la hora de determinar la mejor conexión que se puede proporcionar al usuario. Esta tarea es muy compleja, ya que se conjugan una serie de requisitos provenientes de la red, del usuario y de los servicios, muchos de ellos con intereses opuestos, lo que dificulta la toma de decisiones. Considerando esta premisa, la Tesis ha hecho una contribución a los retos que se presentan en los procesos de selección de acceso, proponiendo una metodología que permite realizar un análisis en base a dos enfoques diferentes pero complementarios entre sí.

Por una parte se ha realizado un modelado desde la perspectiva del usuario, en base a los eventos que se producen en su contexto, para determinar la alternativa de acceso que le asegure la mejor calidad posible para los servicios que utiliza. Se ha considerado que el usuario está en movimiento, por lo que el modelo refleja cualquier cambio en el estado de las redes que le rodean. Cada decisión se realiza únicamente considerando al usuario implicado en ella, por lo que éste no es consciente de las consecuencias que podría tener sobre el resto de la red o los demás usuarios. Una consecuencia es que no es posible determinar si dicha decisión contribuye a un acercamiento del sistema completo al rendimiento máximo que se podría obtener.

Para complementar el enfoque anterior, se ha propuesto un segundo modelo que, mediante un análisis discreto en el tiempo, busca establecer el nivel óptimo del sistema. Para ello se ha hecho uso de técnicas de optimización sobre el escenario utilizado con el anterior enfoque, asegurando una referencia común a la hora de comparar los resultados. En cada instante de tiempo en el que se realiza el análisis, el modelo determina el rendimiento óptimo para el sistema completo, por lo que se podría darse el caso que un usuario experimente un detrimento en su conectividad, sin haber solicitado entrar en un proceso de selección de acceso.

En este capítulo se describen las principales aportaciones derivadas en el marco del desarrollo de la metodología propuesta. Se enumeran además un conjunto de líneas de investigación que se han abierto como consecuencia del trabajo llevado a cabo.

7.1. Aportaciones

A continuación se resumen las contribuciones más relevantes de la Tesis.

1. En primer lugar, la metodología propuesta permite realizar un estudio integral de los procesos de selección de acceso en redes inalámbricas heterogéneas. La complejidad de

este tipo de escenarios complica este análisis, especialmente si se pretende tener en cuenta todas sus características. Es por ello que es habitual encontrar en la literatura trabajos que hacen uso de escenarios que no reflejan adecuadamente la heterogeneidad de las entidades involucradas en los procesos de selección o, en otros casos, que proponen una rígida estructura de análisis, que no permite utilizarlos más allá del escenario para el cual fueron diseñados. La integridad de la metodología propuesta aborda esas limitaciones en base a dos enfoques. Así, se ha diseñado un modelo, denominado mCASE, constituido por entidades cuyas propiedades mimetizan las características más relevantes de los diferentes elementos que forman parte de un proceso real de selección de acceso, permitiendo crear diferentes escenarios de redes heterogéneas en base a la especificación, en número y tipo, de cada elemento (tecnologías de acceso, terminales, estaciones base, usuarios, servicios, etc.). Por otra parte, se ha diseñado un segundo modelo, llamado oGASE, que busca el rendimiento óptimo de todo el sistema, con el objetivo de establecer un marco de referencia con el cual comparar los resultados obtenidos con el primero. Para ello es capaz de replicar el mismo escenario, evitando hacer comparaciones con los resultados de otros estudios, que aun pudiendo tener objetivos similares, presentan diferencias notables en los escenarios utilizados.

2. Para el modelo mCASE se ha diseñado una estructura modular que permite añadir nuevos componentes con la finalidad de incorporar al modelo funcionalidades adicionales para mejorar sus prestaciones, o modificar las ya existentes, adaptando su funcionalidad de manera sencilla. Está constituido por fases que, en cierta manera, reflejan el comportamiento de la red, desde el despliegue de usuarios y estaciones base, hasta el proceso de selección de acceso.
3. Se ha realizado un análisis del proceso de selección de acceso propuesto en el proyecto *Ambient Networks* y, en base a ello, se ha diseñado aquel integrado en el modelo mCASE. La arquitectura de selección de acceso multi-radio planteada en *Ambient Networks* mantiene una estrecha relación con otras entidades funcionales, siguiendo la filosofía de utilizar un plano de control universal. Con el fin de establecer un proceso de selección que no esté ligado a las características particulares de una propuesta concreta, se han abstraído las características más relevantes del propuesto por *Ambient Networks*, proponiendo un esquema que se ajuste mejor a las particularidades de los futuros escenarios de redes inalámbricas.
4. El modelo mCASE hace uso de un algoritmo de selección de acceso basado en la teoría de la utilidad, para lo cual es necesario definir los criterios que representarán los requisitos, tanto del usuario como de la red. Para ello se han empleado funciones matemáticas que reflejan, a través de sus propiedades, el comportamiento real que adoptan dichos criterios. En la literatura existe un amplio abanico de factores que han sido utilizados durante los procesos de selección de acceso, muchos de ellos relacionados con los parámetros de capa física de las tecnologías inalámbricas. En el ámbito de esta Tesis se ha definido un conjunto de criterios más amplio, considerando aspectos como el precio ofrecido por la estación base, el deseo del usuario por evitar una degradación en su servicio, la voluntad del operador de fomentar el balanceo de la carga entre sus estaciones base, la predisposición del usuario de conectarse a su operador preferido, entre otros.
5. En el modelo oGASE, se ha propuesto una máquina de estados finitos que representa el conjunto de posibles situaciones en las que se moverá un determinado par usuario-

servicio: reposo, activo, rechazado, interrumpido. Dicha máquina de estados es la que, en definitiva, proporciona información relevante para, por una parte, determinar el conjunto de pares usuario-servicio que se encuentran en un estado válido para ser optimizados y, además, define el estado final de cada tupla usuario-servicio, en función de los resultados del proceso de optimización.

6. Se ha diseñado e implementado una herramienta de simulación en base al modelo mCASE. Se ha desarrollado un entorno flexible, escalable y de fácil configuración, con el objetivo de poder acometer la evaluación de diversos escenarios y estrategias de selección de acceso. Así, es capaz de adaptarse a los requerimientos del análisis que se pretenda llevar a cabo, permitiendo, por ejemplo, evaluar el impacto de las políticas de precio establecidas por el operador de red, o la tarifa que el usuario está dispuesto a pagar por un servicio, entre otros.
7. Se ha desarrollado una estructura para la gestión eficiente de los eventos producidos en mCASE. Los más frecuentes son aquellos relacionados con los servicios y movimientos de los usuarios. Además, debido a su complejo comportamiento, se han implementado algoritmos para determinar el instante en el que se producen otros eventos, como, por ejemplo, los correspondientes a la monitorización periódica de la conexión y los producidos debido al cruce del límite de cobertura.
8. Se ha diseñado e implementado una herramienta de simulación en base al modelo oGASE. Su desarrollo se fundamenta en muchas de las decisiones de diseño que se adoptaron durante la implementación de la herramienta mCASE, por lo que comparte la mayoría de sus características. Adicionalmente, se ha optado por utilizar un esquema cliente-servidor, para abordar la complejidad del simulador, que hace uso de un elevado número de procesos de optimización durante la simulación de un escenario.
9. Para establecer el rendimiento óptimo de todo el sistema, se ha implementado una estructura lógica que permite tomar una instantánea del estado de la red, los servicios y el usuario, en los intervalos temporales en los que se divide la simulación del escenario. Cada instantánea representa la información proporcionada al simulador oGASE, que, a partir de ella, obtiene las intenciones de los pares usuario-servicio y, junto con su estado anterior, determina las tuplas que formarán parte del problema de optimización.
10. Se ha llevado a cabo la aplicación de las herramientas de simulación implementadas, sobre diversos escenarios que pretenden, por una parte, reflejar las principales características de las redes inalámbricas heterogéneas y, por otra, analizar un caso específico, de acuerdo a criterios provenientes del usuario o la red. Se han analizado cinco escenarios diferentes, en base a los cuales se han extraído las conclusiones que se enumeran a continuación.
 - En el primer escenario correspondiente a mCASE (MC-01), se han incorporado varios operadores, cada uno de ellos gestionando diversos elementos de acceso con diferentes tecnologías. Se han desplegado usuarios que hacen uso de distintos tipos de terminal. Así, se ha puesto de manifiesto la flexibilidad y potencial del modelo, capaz de mimetizar de manera sencilla escenarios altamente heterogéneos. Se han analizado un número elevado de estrategias de selección de acceso, mostrándose el impacto que tienen los pesos de cada criterio sobre los resultados. El más revelador es que el efecto combinado de varios pesos da lugar, en algunos casos, a tendencias

diferentes en los resultados, dependiendo del criterio al cual pertenezcan. Esto ha llevado a la conclusión de que se deben establecer grados de compromiso entre los diferentes parámetros de mérito a la hora de decantarse por una u otra estrategia.

- En el segundo escenario de mCASE se ha analizado un esquema de balanceo de carga basado en el precio ofrecido por las estaciones base, que se modula de acuerdo a su capacidad disponible, con el fin de disuadir o atraer a los usuarios. Se ha mostrado que, únicamente utilizando la información acerca de los usuarios conectados, el método propuesto ofrece un rendimiento adecuado en comparación con una estrategia de balanceo de carga pura. Se ha utilizado un escenario en el que coexisten dos operadores: uno tradicional y otro novel, sobre los cuales se han aplicado diferentes estrategias; los resultados muestran que la carga del operador novel es mayor cuando ofrece precios más baratos, pero esto no significa sin embargo que consiga maximizar sus ingresos.
- En el primer escenario correspondiente a oGASE (OG-01), se han incluido dos operadores, cada uno gestionando elementos de acceso con diferente tecnología radio. Se ha realizado un análisis que ha demostrado que hay ciertas combinaciones que ofrecen un mejor rendimiento que otras (por ejemplo, en función del número de traspasos y la calidad de los enlaces inalámbricos establecidos); así como también se ha visto que dotar de mayor preferencia a la elección de los enlaces de mayor calidad provoca, indirectamente, una disminución del número de traspasos. Después de analizar los resultados de una serie de estrategias, se ha determinado la combinación de parámetros que ofrece un mejor comportamiento, así como la influencia de los diferentes parámetros sobre la forma en que la carga se distribuye entre los distintos tipos de elementos de acceso y operadores.
- A diferencia del OG-01, en el que se ha considerado el servicio únicamente desde el punto de vista de la conectividad necesaria para cursarla, en el segundo escenario de oGASE (OG-02) se ha tenido en cuenta el tráfico subyacente, modelando servicios de diferente naturaleza. Se han estudiado estrategias basadas en el precio ofrecido por el operador, la preferencia del usuario por un operador en particular y el coste de los traspasos, desmostrándose que incorporar este último criterio en las estrategias tiene considerables beneficios, ya que lleva a una mejora notable en términos del número medio de traspasos por servicio, sin perjudicar el resto de figuras de mérito estudiadas, incluso mejorándolas en algunos casos.
- Finalmente, el último escenario se ha utilizado para mostrar las ventajas que se presentan al emplear ambas herramientas en el análisis de un mismo despliegue. Se ha considerado analizar el impacto que puedan producir las políticas de precio que el operador establece por el uso de sus recursos, así como la predisposición que tiene el usuario de asegurar una determinada calidad del servicio, evitando la posible degradación que se podría producir durante un cambio de acceso. Se ha verificado que el rendimiento del sistema analizado en base a mCASE es bastante aceptable, al compararlo con los resultados obtenidos con el modelo que hace uso de las técnicas de optimización, a pesar de la influencia que tienen los pesos dados a los criterios involucrados en el análisis.

Finalmente, algunos resultados del trabajo llevado a cabo en la Tesis han sido publicados en diversos foros, lo que en cierta manera podría confirmar la calidad de los mismos. En el Apéndice A se enumeran todas las publicaciones derivadas de la Tesis, que se resumen en

5 revistas internacionales, 4 de ellas con JCR (*Journal Citation Report*), y una de ámbito nacional; además, se han generado 28 publicaciones en conferencias internacionales y 12 en nacionales. A continuación se enumeran las revistas publicadas hasta la fecha:

- “Optimizing Internet flows over IEEE 802.11b wireless local area networks: a performance enhancing proxy based on forward error correction”, IEEE Communications Magazine, 2001. Factor de impacto 2.286 y ranking en su categoría 3/49.
- “Empowering next-generation wireless personal communication networks”, IEEE Communications Magazine, 2004. Factor de impacto 2.359 y ranking en su categoría 3/57.
- “Coverage extension by means of non-conventional multi-hop communications”, Computer Communications, 2011. Factor de impacto 1.044 y ranking en su categoría 35/79.
- “Optimum selection of access networks within heterogeneous wireless environments based on linear programming techniques”, ACM Springer Mobile Networks and Applications, 2011. Factor de impacto 0.838 y ranking en su categoría 48/79.

7.2. Líneas Futuras de Investigación

A continuación se plantea un conjunto de posibles líneas de investigación que han quedado abiertas, ya sea porque algunos puntos del trabajo podrían ser ampliados, o porque sus aportaciones se podrían utilizar para acometer nuevos retos.

- Considerando que el objetivo principal de la herramienta de simulación mCASE no depende de manera relevante de las abstracciones llevadas a cabo sobre la capa física, se ha utilizado un modelo de propagación simple, enfocando los esfuerzos de diseño de los procesos de simulación en tareas específicamente relacionadas con los procedimientos de selección de acceso. A pesar de ello, mCASE incorpora una estructura que le permitiría implementar opciones más avanzadas, por lo que sería interesante estudiar el efecto de utilizar modelos de propagación más realistas en los escenarios de selección de acceso.
- Durante el diseño de la herramienta mCASE se ha adoptado un modelo abstracto para los recursos que una tecnología de acceso puede ofrecer en cada momento. Como este aspecto depende realmente de las características de determinados parámetros físicos de la tecnología inalámbrica, se podría estudiar el impacto que tendría en los resultados incorporar modelos más realistas, que permitan determinar, por ejemplo, la relación entre la calidad del enlace radio y la capacidad ofrecida por recurso.
- En lo que se refiere al *solver* utilizado en los procesos de optimización, sería interesante evaluar los beneficios que podrían brindar otras alternativas, como Gurobi o CPLEX. Según los estudios comparativos presentados en la literatura, esos *solver* comerciales son considerablemente más rápidos que el GLPK, lo que podría facilitar el análisis de escenarios aún más complejos.
- Asimismo sería interesante ampliar el análisis de los escenarios de selección de acceso considerando otras estrategias, como la aplicación de políticas de precios novedosas por parte de los operadores, reflejando los nuevos modelos de negocio que están apareciendo en la actualidad. Para ello sea posiblemente necesario modelar nuevos criterios tecnológicos, que rijan las relaciones comerciales entre usuario y operadores.

- En lo que se refiere a los pesos de cada criterio utilizado en las estrategias de selección de acceso, queda abierto establecer un mecanismo que determine los valores que garanticen los resultados más apropiados, acorde con los objetivos que se pretenden alcanzar. Esto evitará llevar a cabo intensos análisis parciales, en base a combinaciones de pesos, buscando la combinación ideal.
- Aunque las plataformas están preparadas para trabajar con escenarios en los que se establezcan interacciones tecno-económicas entre distintos operadores, queda abierta explotar esta funcionalidad. Además sería interesante complementar esos estudios con los resultados que se puedan obtener con otras herramientas matemáticas, como la Teoría de Juegos, que permite modelar y analizar escenarios en las que varios operadores tienen que tomar decisiones que podrían dar lugar a situaciones conflictivas. En este sentido, ya se han iniciado estudios preliminares, cuyos resultados han sido publicados en sendos congresos internacionales, enumerados en el Apéndice A.

Publicaciones derivadas de la Tesis

En este apartado se resumen todas las publicaciones que de alguna manera se derivan del trabajo llevado a cabo en la Tesis, así como de los desarrollos realizados en diversos proyectos de investigación que han mantenido una estrecha relación con los objetivos definidos en la misma.

A.1. Revistas internacionales

1. L. Muñoz, M. García, J. Choque, R. Agüero, y P. Mähönen. “Optimizing Internet flows over IEEE 802.11b wireless local area networks: a performance enhancing proxy based on forward error correction”. *IEEE Communications Magazine*, volumen 39, n^o 12, páginas 60–67, 2001
2. L. Muñoz, R. Agüero, J. Choque, J. A. Irastorza, L. Sánchez, M. Petrova, y P. Mähönen. “Empowering next-generation wireless personal communication networks”. *IEEE Communications Magazine*, volumen 42, n^o 5, páginas 64–70, 2004
3. R. Agüero, J. Choque, J. A. Irastorza, L. Muñoz, y L. Sánchez. “WPANs heading towards 4G”. *UPGRADE - The European journal for the informatics professional*, volumen 5, n^o 1, páginas 63–68, 2004
4. R. Agüero, J. Choque, J. A. Irastorza, y L. Muñoz. “Coverage extension by means of non-conventional multi-hop communications”. *Computer Communications*, volumen 34, n^o 18, páginas 2195 – 2206, 2011
5. J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “Optimum selection of access networks within heterogeneous wireless environments based on linear programming techniques”. *ACM Springer Mobile Networks and Applications*, volumen 16, páginas 412–423, 2011. 10.1007/s11036-011-0318-2

A.2. Revistas nacionales

1. R. Agüero, J. Choque, J. A. Irastorza, L. Muñoz, y L. Sánchez. “Las WPAN en el trayecto hacia la 4G”. *Novatica*, volumen 167, páginas 39–43, 2004

A.3. Conferencias internacionales

1. L. Muñoz, J. Choque, y M. García. “Proposal of a P-DTDMA access scheme for multimedia wireless networks”. En *Proceedings of Broadband Access Conference, BAC*, páginas 63–68. 1999
2. L. Muñoz, R. Agüero, M. García, J. Choque, y P. Mähönen. “Enhancing UDP performance over the IEEE 802.11b wireless LAN”. En *Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*, páginas 519–524. 2001
3. M. García, J. Choque, L. Sánchez, y L. Muñoz. “An experimental study of snoop TCP performance over the IEEE 802.11b WLAN”. En *Wireless Personal Multimedia Communications, 2002. The 5th International Symposium on*, volumen 3, páginas 1068 – 1072 vol.3. 2002
4. R. Agüero, L. Sánchez, J. Choque, R. Sanz, L. Muñoz, y J. A. Irastorza. “On the implementation and experimental characterization of the dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks”. En *Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*, páginas 488–492. 2003
5. J. Sachs, L. Muñoz, R. Agüero, J. Choque, G. Koudouridis, R. Karimi, L. Jorguseski, J. Gebert, F. Meago, y F. Berggren. “Future wireless communication based on multi-radio access”. En *Proceedings of the Wireless World Research Forum 11, WWRWF*. 2004
6. R. Agüero, J. Choque, L. Sánchez, L. Muñoz, F. Lucas, y S. Colin. “Empowering cross-layer optimization: Dynamic context awareness in an heterogeneous wireless environment”. En *Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*, páginas 120–124. 2004
7. R. Agüero, M. Berg, J. Choque, J. Hultell, R. Jennen, J. Markendahl, L. Muñoz, M. Prytz, y O. Strandberg. “RRM challenges for non-conventional and low-cost networks in Ambient Networks”. En *Proceedings of the Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2005
8. R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “Analysis of IP-based communications over a real multi-hop testbed based on the DSR protocol”. En *Proceedings of the 8th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2005
9. R. Agüero, J. Galache, J. Choque, y L. Muñoz. “An improved associativity degree based cluster formation algorithm modulated by link quality”. En *Proceedings of the 8th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2005
10. M. Kampmann, M. Vorwerk, I. Grothues, M. d. M. Ivars de Leon, M. Kleis, S. Schuetz, S. Schmid, R. Agüero, y J. Choque. “An experimental study of novel Ambient Network concepts”. En *Proceedings of the 13th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM*. 2005
11. M. Kampmann, M. Vorwerk, M. Kleis, S. Schmid, S. Herborn, R. Agüero, y J. Choque. “A multimedia delivery framework for Ambient Networks”. En *Proceedings of the Wireless World Research Forum 12, WWRWF*. 2005

12. G. Koudouridis, R. Agüero, E. Alexandri, J. Choque, K. Dimou, R. Karimi, H. Lederer, J. Sachs, y R. Sigle. “Generic link layer functionality for multi-radio access networks”. En *Proceedings of the 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit*. 2005
13. R. Agüero, J. Choque, L. Martínez, y L. Muñoz. “Broadcast efficiency in clustered, spontaneous wireless network deployments”. En *Proceedings of the 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2006
14. J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “End-to-end QoS for mobile heterogeneous networks. a generic architecture proposal”. En *Proceedings of the 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2006
15. J. Mäkelä, R. Agüero, D. Hollos, y J. Choque. “Ambient mobility in practice - mechanisms for moving network & triggering”. En *Proceedings of the 15th IST Mobile and Wireless Communications Summit*. 2006
16. J. Mäkelä, R. Agüero, J. Tenhunen, V. Kyllönen, J. Choque, y L. Muñoz. “Paving the way for future mobility mechanisms: a testbed for mobility triggering and moving network support”. En *Proceedings of the 2nd International IEEE/Create-Net Tridentcom*. 2006
17. M. Vorwerk, S. Schuetz, R. Agüero, J. Choque, S. Schmid, M. Kleis, M. Kampman, y M. Erkoc. “Ambient Networks in practice: instant media services for users on the move”. En *Proceedings of the 2nd International IEEE/Create-Net Tridentcom*. 2006
18. F. Meago, J. Gebert, J. Sachs, J. Choque, R. Agüero, y O. Blume. “On capacity/load-based and availability-based resource abstractions for multi-access networks”. En *Proceedings of the 1st Ambient Networks Workshop on Mobility, Multiaccess and Network Management, M2NM*. 2007
19. R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “On the relay-based coverage extension for non-conventional multi-hop wireless networks”. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, ICC*. 2007
20. R. Agüero, J. Gebert, J. Choque, y H. Eckhardt. “Towards a multi-access prototype in Ambient Networks”. En *Proceedings of the 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit*. 2007
21. P. Pääkkönen, P. Salmela, R. Agüero, y J. Choque. “An integrated Ambient Networks prototype”. En *Proceedings of the 15th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM*. 2007
22. P. Pääkkönen, P. Salmela, R. Agüero, y J. Choque. “Performance analysis of HIP-based mobility and triggering”. En *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008. WoWMoM 2008. 2008 International Symposium on a*, páginas 1 –9. 2008
23. R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “On the outage probability for multi-hop communications over array network deployments”. En *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, páginas 2939 –2944. 2008
24. R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “Multi-hop extensions to heterogeneous access network selection”. En *Proceedings of the 2nd International ICST Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems, MOBILIGHT*. 2010

25. J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “Simulation framework for the evaluation of access selection algorithms over heterogeneous wireless networks”. En *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Mobile Networks and Management, MONAMI*. 2011
26. J. Choque, R. Agüero, J. Serrat, y L. Muñoz. “A price based load balancing scheme for multi-operator wireless access networks”. En *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Mobile Networks and Management, MONAMI*. 2012
27. C. López, R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “On the equilibrium of resource allocation for heterogeneous wireless access networks”. En *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012 IEEE 23rd International Symposium on*, páginas 1049–1054. IEEE, 2012
28. C. López, J. Choque, R. Agüero, J. Serrat, y L. Muñoz. “On the equilibrium of pricing assignment for heterogeneous wireless access networks”. En *Mobile Networks and Management*, volumen 58 de *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, páginas 99–113. Springer Berlin Heidelberg, 2013

A.4. Conferencias nacionales

1. L. Muñoz, J. Choque, M. García, y R. Sanz. “Propuesta de un protocolo de acceso P-DTDMA para redes inalámbricas de banda ancha”. En *Actas de las II Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 413–418. 1999
2. J. Choque, L. Muñoz, M. García, y R. Agüero. “Provisión de servicios IP sobre infraestructuras inalámbricas heterogéneas”. En *Actas de las III Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 301–305. 2001
3. R. Agüero, M. García, J. Choque, y L. Muñoz. “Caracterización del protocolo UDP sobre redes de área local inalámbricas IEEE 802.11b”. En *Actas de las III Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 235–241. 2001
4. J. A. Irastorza, J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “Abriendo el camino hacia la cuarta generación: una nueva arquitectura de redes de área personal inalámbricas”. En *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 377–384. 2003
5. R. Sanz, R. Agüero, L. Sánchez, J. Choque, y L. Muñoz. “Mejora de las prestaciones de la pila TCP/IP en entornos inalámbricos multisalto”. En *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 393–400. 2003
6. R. Agüero, M. García, L. Sánchez, J. Choque, y L. Muñoz. “Efecto combinado de técnicas de nivel de enlace independientes en el comportamiento de los protocolos de transporte de Internet sobre redes de área local inalámbricas”. En *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 183–188. 2003
7. R. Agüero, L. Sánchez, M. García, J. Choque, y L. Muñoz. “Análisis experimental del comportamiento de TCP sobre IEEE 802.11b y del protocolo Snoop como mecanismo de mejora”. En *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*. 2003

8. R. Agüero, J. Choque, J. Lanza, L. Sánchez, y L. Muñoz. “Estudio experimental de los protocolos IP en redes inalámbricas multi-salto basadas en el protocolo DSR”. En *Actas de las VI Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*. 2005
9. J. A. Galache, R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “Plataforma para la gestión y monitorización de múltiples interfaces heterogéneas subyacentes”. En *Actas de las VII Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 411–414. 2008
10. R. Agüero, J. Choque, E.-M. Hortigüela, y L. Muñoz. “Aplicación de técnicas de programación lineal en la asignación óptima de recursos en redes inalámbricas heterogéneas”. En *Actas de las IX Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 175–182. 2010
11. L. Sánchez, J. Lanza, J. Choque, y L. Muñoz. “Arquitectura de una entidad middleware para la gestión cognitiva de las comunicaciones en terminales multiradio”. En *Actas de las IX Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 17–24. 2010
12. J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “Entorno de simulación para la evaluación de algoritmos de selección de acceso en redes inalámbricas heterogéneas”. En *Actas de las X Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 137–144. 2011

Índice de Figuras

2.1.	Evolución de los antecedentes de la investigación	12
2.2.	Niveles de interacción para la gestión conjunta de recursos radio	17
2.3.	Etapas del proceso de selección de acceso	19
3.1.	Arquitectura funcional de Ambient Networks	25
3.2.	Diagrama funcional de la arquitectura de acceso multi-radio	27
3.3.	Mecanismos incluidos en OConS	32
3.4.	Procedimientos de orquestación en un caso de uso específico	34
3.5.	Esquema general de la actividades del proyecto mIO!	35
3.6.	Diagrama funcional de la arquitectura del Gestor de Comunicaciones	38
4.1.	Arquitectura funcional de mCASE	43
4.2.	Entidades de mCASE	43
4.3.	Estructura lógica de mCASE	45
4.4.	Proceso de selección de acceso	46
4.5.	Función de utilidad del criterio de precio	48
4.6.	Función de utilidad del criterio de carga	49
4.7.	Entidades funcionales de modelo oGASE	52
4.8.	Máquina de estados para un par usuario-servicio	57
5.1.	Estructura jerárquica del modelado de tráfico	64
5.2.	Modelado del tráfico de los servicios	65
5.3.	Modelo Random WayPoint con procedimiento de reflexión	66
5.4.	Eventos gestionados por mCASE	68
5.5.	Especificación de <i>PM_event</i> dentro de las conexiones de un servicio	69
5.6.	Detección de <i>CC_event</i> para las conexiones de un servicio	71
5.7.	Diagrama de flujo del procedimiento de petición de recursos	72
5.8.	Diagramas de flujo de los procedimientos de detección y validación de los AE	73
5.9.	Políticas de precio implementadas en mCASE	74
5.10.	Diagrama funcional de las políticas de precio	75
5.11.	Diagrama de flujo del procedimiento de accesos candidatos	77
5.12.	Estructura del funcionamiento del simulador mCASE	78
5.13.	Parámetros de mCASE.cfg relacionados con la configuración	81
5.14.	Parámetros de mCASE.cfg que definen las entidades	82
5.15.	Parámetros de mCASE.cfg que especifican las estrategias	83
5.16.	Estructura del funcionamiento del simulador oGASE	83
5.17.	Arquitectura software de oGASE	85
5.18.	Matriz de restricciones	90
5.19.	Ubicación en el tiempo de los procedimientos relacionados con la optimización	91

5.20. Máquina de estados intermedio para un par usuario-servicio	93
5.21. Máquina de estados finales para un par usuario-servicio optimizable	93
5.22. Protocolo de comunicación entre cliente y servidor	95
6.1. Despliegue de red del escenario MC-01	99
6.2. Prestaciones de las estrategias de acceso con tres tipos de terminales	102
6.3. Prestaciones de las estrategias de acceso solo con tipo de terminal avanzado	103
6.4. Precio de la estación base en función de la carga actual	105
6.5. Función hiperbólica de la carga	107
6.6. Despliegue de red del escenario MC-02	108
6.7. Prestaciones de las estrategias de acceso desde el punto de vista del usuario	110
6.8. Prestaciones de las estrategias de acceso desde el punto de vista del operador	111
6.9. Despliegue de red del escenario OG-01	113
6.10. Variación instantánea de los parámetros de mérito para la estrategia B	115
6.11. Rendimiento de las estrategias de selección de acceso	117
6.12. Rendimiento para distintas combinaciones de $(\omega_{ho}, \omega_{lq})$	118
6.13. Rendimiento para distintas combinaciones de $(\omega_{op}, \omega_{ho})$	119
6.14. CDF de las tres estrategias mostradas en la Figura 6.12	120
6.15. Rendimiento de las estrategias en función de la capacidad y la carga	121
6.16. Despliegue de red del escenario OG-02	124
6.17. Probabilidad de finalización de servicios con éxito Vs. número de usuarios	126
6.18. Número medio de trasposos por servicio Vs. número de usuarios	127
6.19. Precio medio por servicio Vs. número de usuarios	127
6.20. RAT <i>affinity</i> medio por servicio Vs. número de usuarios	128
6.21. Rendimiento de las diferentes estrategias de OG-02	129
6.22. Estrategia basada en el precio	129
6.23. Despliegue de red del escenario final	131
6.24. Impacto del parámetro de descuento (χ) en el escenario analizado por mCASE	136
6.25. Precio medio por servicio para los diversos esquemas analizados	137
6.26. Número medio de trasposos por servicio para los diversos esquemas analizados	138
6.27. Rendimiento general de oGASE para los diversos esquemas analizados	139
6.28. Rendimiento general de mCASE para los diversos esquemas analizados	140

Índice de Tablas

6.1. Características de las tecnologías empleadas en el escenario MC-01	98
6.2. Características de los servicios utilizados en el escenario MC-01	99
6.3. Características del modelo <i>Random WayPoint</i> usado en el escenario MC-01 .	100
6.4. Estrategias de selección de acceso del escenario MC-01	100
6.5. Estrategias de selección de acceso del escenario MC-02	105
6.6. Tecnologías involucradas en el escenario MC-02	107
6.7. Tecnologías incluidas en el escenario OG-01	112
6.8. Características del modelo <i>Random WayPoint</i> usado en el escenario OG-01 .	112
6.9. Estrategias de selección de acceso usadas en OG-01	114
6.10. Parámetros del análisis en OG-02	123
6.11. Estrategias utilizadas en el escenario OG-02	125
6.12. Estrategias utilizadas en el escenario final	132
6.13. Figuras de mérito para evaluar el rendimiento del escenario final	134

Lista de acrónimos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	4th Generation Networks
AN	Ambient Networks
API	Application Programming Interface
CRRM	Common Radio Resource Management
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
GLPK	GNU Linear Programming Kit
GSM	Global System for Mobile Communications
HSPA	High-Speed Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
JRRM	Joint Radio Resource Management
LTE	Long Term Evolution
mCASE	multi-Constraint Access Selection in heterogeneous Environments
MIP	Mixed Integer Programming
MU	Monetary Unit
NGWN	Next Generation Wireless Networks
oGASE	Optimum and Global Access Selection in heterogeneous Environments
OSI	Open Systems Interconnection
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technology
RRM	Radio Resource Management
SAIL	Scalable and Adaptative Internet Solutions
TCP	Transmission Control Protocol

TU	Traffic Unit
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UT	User Terminal
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Bibliografía

- [Acampora y Krishnamurthy, 1997] A. Acampora y S. Krishnamurthy. “A new adaptive MAC layer protocol for wireless ATM networks in harsh fading and interference environments”. En *IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications Record*, volumen 2, páginas 410–415 vol.2. 1997.
- [Agüero et al., 2005a] R. Agüero, M. Berg, J. Choque, J. Hultell, R. Jennen, J. Markendahl, L. Muñoz, M. Prytz, y O. Strandberg. “RRM challenges for non-conventional and low-cost networks in Ambient Networks”. En *Proceedings of the Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2005.
- [Agüero et al., 2010a] R. Agüero, J. Choque, E.-M. Hortigüela, y L. Muñoz. “Aplicación de técnicas de programación lineal en la asignación óptima de recursos en redes inalámbricas heterogéneas”. En *Actas de las IX Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 175–182. 2010.
- [Agüero et al., 2011] R. Agüero, J. Choque, J. A. Irastorza, y L. Muñoz. “Coverage extension by means of non-conventional multi-hop communications”. *Computer Communications*, volumen 34, nº 18, páginas 2195 – 2206, 2011.
- [Agüero et al., 2004a] R. Agüero, J. Choque, J. A. Irastorza, L. Muñoz, y L. Sánchez. “Las WPAN en el trayecto hacia la 4G”. *Novatica*, volumen 167, páginas 39–43, 2004.
- [Agüero et al., 2004b] R. Agüero, J. Choque, J. A. Irastorza, L. Muñoz, y L. Sánchez. “WPANs heading towards 4G”. *UPGRADE - The European journal for the infomatics professional*, volumen 5, nº 1, páginas 63–68, 2004.
- [Agüero et al., 2005b] R. Agüero, J. Choque, J. Lanza, L. Sánchez, y L. Muñoz. “Estudio experimental de los protocolos IP en redes inalámbricas multi-salto basadas en el protocolo DSR”. En *Actas de las VI Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*. 2005.
- [Agüero et al., 2006] R. Agüero, J. Choque, L. Martínez, y L. Muñoz. “Broadcast efficiency in clustered, spontaneous wireless network deployments”. En *Proceedings of the 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2006.
- [Agüero et al., 2005c] R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “Analysis of IP-based communications over a real multi-hop testbed based on the DSR protocol”. En *Proceedings of the 8th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2005.
- [Agüero et al., 2007a] R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “On the relay-based coverage extension for non-conventional multi-hop wireless networks”. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, ICC*. 2007.

- [Agüero et al., 2008] R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “On the outage probability for multi-hop communications over array network deployments”. En *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, páginas 2939–2944. 2008.
- [Agüero et al., 2010b] R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “Multi-hop extensions to heterogeneous access network selection”. En *Proceedings of the 2nd International ICST Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems, MOBILIGHT*. 2010.
- [Agüero et al., 2004c] R. Agüero, J. Choque, L. Sánchez, L. Muñoz, F. Lucas, y S. Colin. “Empowering cross-layer optimization: Dynamic context awareness in a heterogeneous wireless environment”. En *Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*, páginas 120–124. 2004.
- [Agüero et al., 2005d] R. Agüero, J. Galache, J. Choque, y L. Muñoz. “An improved associativity degree based cluster formation algorithm modulated by link quality”. En *Proceedings of the 8th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2005.
- [Agüero et al., 2001] R. Agüero, M. García, J. Choque, y L. Muñoz. “Caracterización del protocolo UDP sobre redes de área local inalámbricas IEEE 802.11b”. En *Actas de las III Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 235–241. 2001.
- [Agüero et al., 2003a] R. Agüero, M. García, L. Sánchez, J. Choque, y L. Muñoz. “Efecto combinado de técnicas de nivel de enlace independientes en el comportamiento de los protocolos de transporte de Internet sobre redes de área local inalámbricas”. En *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 183–188. 2003.
- [Agüero et al., 2007b] R. Agüero, J. Gebert, J. Choque, y H. Eckhardt. “Towards a multi-access prototype in Ambient Networks”. En *Proceedings of the 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit*. 2007.
- [Agüero et al., 2003b] R. Agüero, L. Sánchez, J. Choque, R. Sanz, L. Muñoz, y J. A. Irastorza. “On the implementation and experimental characterization of the dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks”. En *Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*, páginas 488–492. 2003.
- [Agüero et al., 2003c] R. Agüero, L. Sánchez, M. García, J. Choque, y L. Muñoz. “Análisis experimental del comportamiento de TCP sobre IEEE 802.11b y del protocolo Snoop como mecanismo de mejora”. En *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*. 2003.
- [Ahlgren et al., 2011] B. Ahlgren, P. A. Aranda, P. Chemouil, S. Oueslati, L. M. Correia, H. Karl, M. Sollner, y A. Welin. “Content, connectivity, and cloud: ingredients for the network of the future”. *Communications Magazine, IEEE*, volumen 49, nº 7, páginas 62–70, 2011.
- [Alcarria et al., 2010] R. Alcarria, T. Robles, A. M. Domínguez, y S. González-Miranda. “Plataforma de composición, provisión y consumo de servicios para el nuevo universo inteligente”. En *Actas de las IX Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*. 2010.

- [Alkhwilani y Ayes, 2008] M. Alkhwilani y A. Ayes. “Access network selection based on fuzzy logic and genetic algorithms”. *Adv. in Artif. Intell.*, volumen 8, nº 1, páginas 1:1–1:12, 2008.
- [Amzallag et al., 2013] D. Amzallag, R. Bar-Yehuda, D. Raz, y G. Scalosub. “Cell selection in 4G cellular networks”. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, volumen 12, nº 7, páginas 1443–1455, 2013.
- [Baldemair et al., 2013] R. Baldemair, E. Dahlman, G. Fodor, G. Mildh, S. Parkvall, Y. Selen, H. Tullberg, y K. Balachandran. “Evolving wireless communications: Addressing the challenges and expectations of the future”. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, volumen 8, nº 1, páginas 24–30, 2013.
- [Bari y Leung, 2007] F. Bari y V. Leung. “Application of electre to network selection in a heterogeneous wireless network environment”. En *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*, páginas 3810–3815. 2007.
- [Bettstetter et al., 2003] C. Bettstetter, G. Resta, y P. Santi. “The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks”. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, volumen 2, nº 3, páginas 257 – 269, 2003.
- [Camp et al., 2002] T. Camp, J. Boleng, y V. Davies. “A survey of mobility models for ad hoc network research”. *Wireless Communications and Mobile Computing*, volumen 2, nº 5, páginas 483–502, 2002.
- [Casadevall et al., 2004] F. Casadevall, P. Karlsson, O. Sallent, H. Gonzalez, A. Barbaresi, M. Dohler, y M. Dinis. “Overview of the EVEREST project”. En *IST Mobile Summit*. 2004.
- [Casadevall et al., 2006] F. Casadevall, R. Lung, A. Vega, A. Barbaresi, N. Nafisi, A. Gomes, y L. Correia. “Overview of the AROMA project”. En *IST Mobile & Wireless Communications Summit*. 2006.
- [Chang, 1999] X. Chang. “Network simulations with OPNET”. En *Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: Simulation—a bridge to the future-Volume 1*, páginas 307–314. ACM, 1999.
- [Choque et al., 2006] J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “End-to-end QoS for mobile heterogeneous networks. a generic architecture proposal”. En *Proceedings of the 9th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*. 2006.
- [Choque et al., 2011a] J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “Entorno de simulación para la evaluación de algoritmos de selección de acceso en redes inalámbricas heterogéneas”. En *Actas de las X Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 137–144. 2011.
- [Choque et al., 2011b] J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “Optimum selection of access networks within heterogeneous wireless environments based on linear programming techniques”. *ACM Springer Mobile Networks and Applications*, volumen 16, páginas 412–423, 2011. 10.1007/s11036-011-0318-2.
- [Choque et al., 2011c] J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “Simulation framework for the evaluation of access selection algorithms over heterogeneous wireless networks”. En

- Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Mobile Networks and Management, MONAMI*. 2011.
- [Choque et al., 2012] J. Choque, R. Agüero, J. Serrat, y L. Muñoz. “A price based load balancing scheme for multi-operator wireless access networks”. En *Proceedings of the 4th International ICST Conference on Mobile Networks and Management, MONAMI*. 2012.
- [Choque et al., 2001] J. Choque, L. Muñoz, M. García, y R. Agüero. “Provisión de servicios IP sobre infraestructuras inalámbricas heterogéneas”. En *Actas de las III Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 301–305. 2001.
- [de Sousa et al., 2006] V. de Sousa, R. de O. Neto, F. de S. Chaves, L. Cardoso, y F. Cavalcanti. “Access selection with connection reallocation for multi-access networks”. En *Telecommunications Symposium, 2006 International*, páginas 615–619. 2006.
- [Dobkin, 2002] D. Dobkin. “Indoor propagation issues for wireless LANs”. *RF Design*, páginas 40–46, 2002.
- [Ericsson Consumer Lab, 2013] Ericsson Consumer Lab. “Ericsson mobility report - on the pulse of the networked society”. 2013.
- [Falowo y Anthony Chan, 2008] O. Falowo y H. Anthony Chan. “Optimal joint radio resource management to improve connection-level QoS in next generation wireless networks”. En *Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE*. 2008.
- [Falowo y Chan, 2008] O. E. Falowo y H. A. Chan. “Joint call admission control algorithms: Requirements, approaches, and design considerations”. *Comput. Commun.*, volumen 31, n^o 6, páginas 1200–1217, 2008.
- [Ferreira et al., 2013] L. Ferreira, R. Agüero, L. Caeiro, A. Miron, M. Soellner, P. Schoo, L. Suciú, A. Timm-Giel, y A. Udugama. “Open connectivity services for the future internet”. En *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*, páginas 2363–2368. IEEE, 2013.
- [Frattasi et al., 2006] S. Frattasi, H. Fathi, F. Fitzek, R. Prasad, y M. Katz. “Defining 4G technology from the users perspective”. *Network, IEEE*, volumen 20, n^o 1, páginas 35–41, 2006.
- [Galache et al., 2008] J. A. Galache, R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “Plataforma para la gestión y monitorización de múltiples interfaces heterogéneas subyacentes”. En *Actas de las VII Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 411–414. 2008.
- [García et al., 2002] M. García, J. Choque, L. Sánchez, y L. Muñoz. “An experimental study of snoop TCP performance over the IEEE 802.11b WLAN”. En *Wireless Personal Multimedia Communications, 2002. The 5th International Symposium on*, volumen 3, páginas 1068 – 1072 vol.3. 2002.
- [Giupponi et al., 2007] L. Giupponi, R. Agustí, J. Perez-Romero, y O. Salient. “Improved revenue and radio resource usage through inter-operator joint radio resource management”. En *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*. 2007.

- [Giupponi et al., 2005] L. Giupponi, R. Agusti, J. Perez-Romero, y O. Sallent. “Joint radio resource management algorithm for multi-RAT networks”. En *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM '05. IEEE*, volumen 6. 2005.
- [Gohil et al., 2013] A. Gohil, H. Modi, y S. Patel. “5G technology of mobile communication: A survey”. En *Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), 2013 International Conference on*, páginas 288–292. 2013.
- [Gonzalvez, 2006] J. Gonzalvez. “Moving beyond 3G [mobile radio]”. *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, volumen 1, n^o 2, páginas 48–55, 2006.
- [Hashimoto et al., 2008] A. Hashimoto, H. Yoshino, y H. Atarashi. “Roadmap of IMT-advanced development”. *Microwave Magazine, IEEE*, volumen 9, n^o 4, páginas 80–88, 2008.
- [Hassan et al., 2005] H. Hassan, J. M. Garcia, y O. Brun. “Generic modeling of multimedia traffic sources”. En *Proceedings of the 3rd International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks, HET-NETs '05*. 2005.
- [Heidemann et al., 2001] J. Heidemann, N. Bulusu, J. Elson, C. Intanagonwiwat, K. chan Lan, Y. Xu, W. Ye, D. Estrin, y R. Govindan. “Effects of detail in wireless network simulation”. En *SCS Multiconference on Distributed Simulation Society for Computer Simulation, Phoenix, Arizona, January 2001*, páginas 3 – 11. 2001.
- [Henderson et al., 2006] T. R. Henderson, S. Roy, S. Floyd, y G. F. Riley. “ns-3 project goals”. En *Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator*, página 13. ACM, 2006.
- [Hu et al., 2010] H. Hu, J. Zhang, X. Zheng, Y. Yang, y P. Wu. “Self-configuration and self-optimization for lte networks”. *Communications Magazine, IEEE*, volumen 48, n^o 2, páginas 94–100, 2010.
- [Irastorza et al., 2003] J. A. Irastorza, J. Choque, R. Agüero, y L. Muñoz. “Abriendo el camino hacia la cuarta generación: una nueva arquitectura de redes de área personal inalámbricas”. En *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 377–384. 2003.
- [Jimaa et al., 2011] S. Jimaa, K. K. Chai, Y. Chen, y Y. Alfadhl. “LTE-A an overview and future research areas”. En *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2011 IEEE 7th International Conference on*, páginas 395–399. 2011.
- [Kampmann et al., 2005a] M. Kampmann, M. Vorwerk, I. Grothues, M. d. M. Ivars de Leon, M. Kleis, S. Schuetz, S. Schmid, R. Aguero, y J. Choque. “An experimental study of novel Ambient Network concepts”. En *Proceedings of the 13th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM*. 2005.
- [Kampmann et al., 2005b] M. Kampmann, M. Vorwerk, M. Kleis, S. Schmid, S. Herborn, R. Agüero, y J. Choque. “A multimedia delivery framework for Ambient Networks”. En *Proceedings of the Wireless World Research Forum 12, WWRWF*. 2005.

- [Karthikeyan Krishnasamy y Narayanasamy Palanisamy, 2006] N. Karthikeyan Krishnasamy y P. Narayanasamy Palanisamy. “Bandwidth allocation scheme for multimedia mobile networks using optimization techniques”. En *Cybernetics and Intelligent Systems, 2006 IEEE Conference on*. 2006.
- [Kasch et al., 2009] W. Kasch, J. Ward, y J. Andrusenko. “Wireless network modeling and simulation tools for designers and developers”. *Communications Magazine, IEEE*, volumen 47, n^o 3, páginas 120–127, 2009.
- [Kassar et al., 2008] M. Kassar, B. Kervella, y G. Pujolle. “An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks”. *Computer Communications*, volumen 31, n^o 10, páginas 2607–2620, 2008.
- [Klemm et al., 2001] A. Klemm, C. Lindemann, y M. Lohmann. “Traffic modeling and characterization for UMTS networks”. En *Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. IEEE*, volumen 3, páginas 1741–1746 vol.3. 2001.
- [Koudouridis et al., 2005] G. Koudouridis, R. Agüero, E. Alexandri, J. Choque, K. Dimou, R. Karimi, H. Lederer, J. Sachs, y R. Sigle. “Generic link layer functionality for multi-radio access networks”. En *Proceedings of the 14th IST Mobile and Wireless Communications Summit*. 2005.
- [Lee et al., 2009] H. Lee, V. Manshadi, y D. Cox. “High-fidelity and time-driven simulation of large wireless networks with parallel processing”. *Communications Magazine, IEEE*, volumen 47, n^o 3, páginas 158–165, 2009.
- [López et al., 2012] C. López, R. Agüero, J. Choque, y L. Muñoz. “On the equilibrium of resource allocation for heterogeneous wireless access networks”. En *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2012 IEEE 23rd International Symposium on*, páginas 1049–1054. IEEE, 2012.
- [López et al., 2013] C. López, J. Choque, R. Agüero, J. Serrat, y L. Muñoz. “On the equilibrium of pricing assignment for heterogeneous wireless access networks”. En *Mobile Networks and Management*, volumen 58 de *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, páginas 99–113. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [Lucas-Estañ y Gozalvez, 2013] M. Lucas-Estañ y J. Gozalvez. “On the real-time hardware implementation feasibility of joint radio resource management policies for heterogeneous wireless networks”. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, volumen 12, n^o 2, páginas 193–205, 2013.
- [Lucas-Estañ et al., 2008] M. Lucas-Estañ, J. Gozalvez, y J. Sanchez-Soriano. “Common radio resource management policy for multimedia traffic in beyond 3G heterogeneous wireless systems”. En *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, páginas 1–5. 2008.
- [Lucas-Estañ et al., 2012] M. Lucas-Estañ, J. Gozalvez, y J. Sanchez-Soriano. “Integer linear programming optimization of joint RRM policies for heterogeneous wireless systems”. *Computer Networks*, volumen 56, n^o 1, páginas 112–126, 2012.

- [Mähönen et al., 2001] P. Mähönen, T. Saarinen, N. Passas, G. Orphanos, M. García, L. Muñoz, A. Marshall, D. Melpignano, T. Inzerilli, F. Lucas, y M. Vitiello. “Platform-independent IP transmission over wireless networks: the WINE approach”. *Personal Communications, IEEE*, volumen 8, n^o 6, páginas 32–40, 2001.
- [Mäkelä et al., 2006a] J. Mäkelä, R. Agüero, D. Hollos, y J. Choque. “Ambient mobility in practice - mechanisms for moving network & triggering”. En *Proceedings of the 15th IST Mobile and Wireless Communications Summit*. 2006.
- [Mäkelä et al., 2006b] J. Mäkelä, R. Agüero, J. Tenhunen, V. Kyllonen, J. Choque, y L. Muñoz. “Paving the way for future mobility mechanisms: a testbed for mobility triggering and moving network support”. En *Proceedings of the 2nd International IEEE/Create-Net Tridentcom*. 2006.
- [Makhorin, 2014] A. Makhorin. *GNU Linear Programming Kit. Reference Manual, Version 4.54*, 2014.
- [McNair y Zhu, 2004] J. McNair y F. Zhu. “Vertical handoffs in fourth-generation multinet-work environments”. *Wireless Communications, IEEE*, volumen 11, n^o 3, páginas 8–15, 2004.
- [Meago et al., 2007] F. Meago, J. Gebert, J. Sachs, J. Choque, R. Agüero, y O. Blume. “On capacity/load-based and availability-based resource abstractions for multi-access networks”. En *Proceedings of the 1st Ambient Networks Workshop on Mobility, Multiaccess and Network Management, M2NM*. 2007.
- [Miozzo y Bader, 2011] M. Miozzo y F. Bader. “Accurate modelling of OFDMA transmission technique using IEEE 802.16m recommendations for WiMAX network simulator design”. En *Mobile Networks and Management*, páginas 258–269. Springer, 2011.
- [Muñoz et al., 2004] L. Muñoz, R. Agüero, J. Choque, J. A. Irastorza, L. Sánchez, M. Petrova, y P. Mähönen. “Empowering next-generation wireless personal communication networks”. *IEEE Communications Magazine*, volumen 42, n^o 5, páginas 64–70, 2004.
- [Muñoz et al., 2001a] L. Muñoz, R. Agüero, M. García, J. Choque, y P. Mähönen. “Enhancing UDP performance over the IEEE 802.11b wireless LAN”. En *Proceedings of the 4th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC*, páginas 519–524. 2001.
- [Muñoz et al., 1999a] L. Muñoz, J. Choque, y M. García. “Proposal of a P-DTDMA access scheme for multimedia wireless networks”. En *Proceedings of Broadband Access Conference, BAC*, páginas 63–68. 1999.
- [Muñoz et al., 1999b] L. Muñoz, J. Choque, M. García, y R. Sanz. “Propuesta de un protocolo de acceso P-DTDMA para redes inalámbricas de banda ancha”. En *Actas de las II Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 413–418. 1999.
- [Muñoz et al., 2001b] L. Muñoz, M. García, J. Choque, R. Agüero, y P. Mähönen. “Optimizing Internet flows over IEEE 802.11b wireless local area networks: a performance enhancing proxy based on forward error correction”. *IEEE Communications Magazine*, volumen 39, n^o 12, páginas 60–67, 2001.

- [Nasser y Hassanein, 2004] N. Nasser y H. Hassanein. “Dynamic threshold-based call admission framework for prioritized multimedia traffic in wireless cellular networks”. En *Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE*, volumen 2, páginas 644–649. IEEE, 2004.
- [Nguyen-Vuong et al., 2008a] Q.-T. Nguyen-Vuong, N. Agoulmine, y Y. Ghamri-Doudane. “A user-centric and context-aware solution to interface management and access network selection in heterogeneous wireless environments”. *Computer Networks*, volumen 52, n^o 18, páginas 3358–3372, 2008.
- [Nguyen-Vuong et al., 2008b] Q.-T. Nguyen-Vuong, Y. Ghamri-Doudane, y N. Agoulmine. “On utility models for access network selection in wireless heterogeneous networks”. En *Network Operations and Management Symposium, 2008. NOMS 2008. IEEE*, páginas 144–151. 2008.
- [Niebert et al., 2007] N. Niebert, A. Schieder, J. Zander, y R. Hancock. *Ambient networks: co-operative mobile networking for the wireless world*. John Wiley & Sons, 2007.
- [O’Droma y Ganchev, 2007] M. O’Droma y I. Ganchev. “Toward a ubiquitous consumer wireless world”. *Wireless Communications, IEEE*, volumen 14, n^o 1, páginas 52–63, 2007.
- [Pääkkönen et al., 2007] P. Pääkkönen, P. Salmela, R. Agüero, y J. Choque. “An integrated Ambient Networks prototype”. En *Proceedings of the 15th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM*. 2007.
- [Pääkkönen et al., 2008] P. Pääkkönen, P. Salmela, R. Agüero, y J. Choque. “Performance analysis of HIP-based mobility and triggering”. En *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008. WoWMoM 2008. 2008 International Symposium on a*, páginas 1–9. 2008.
- [Pérez-Romero et al., 2007] J. Pérez-Romero, O. Sallent, y R. Agustí. “A novel metric for context-aware RAT selection in wireless multi-access systems”. En *Communications, 2007. ICC'07. IEEE International Conference on*, páginas 5622–5627. IEEE, 2007.
- [Perez-Romero et al., 2005] J. Perez-Romero, O. Sallent, R. Agusti, P. Karlsson, A. Barbarresi, L. Wang, F. Casadevall, M. Dohler, H. Gonzalez, y F. Cabral-Pinto. “Common radio resource management: functional models and implementation requirements”. En *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on*. 2005.
- [Piamrat et al., 2011] K. Piamrat, A. Ksentini, J.-M. Bonnin, y C. Viho. “Radio resource management in emerging heterogeneous wireless networks”. *Computer Communications*, volumen 34, n^o 9, páginas 1066 – 1076, 2011. <ce:title>Special Issue: Next Generation Networks Service Management</ce:title>.
- [Pirmez et al., 2010] L. Pirmez, J. C. C. Jr., F. C. Delicato, F. Protti, L. F. Carmo, P. F. Pires, y M. Pirmez. “SUTIL - network selection based on utility function and integer linear programming”. *Computer Networks*, volumen 54, n^o 13, páginas 2117 – 2136, 2010.

- [Poyhonen et al., 2007] P. Poyhonen, J. Tuononen, H. Tang, y O. Strandberg. “Study of handover strategies for multi-service and multi-operator ambient networks”. En *Communications and Networking in China, 2007. CHINACOM '07. Second International Conference on*, páginas 755–762. 2007.
- [Raychaudhuri y Wilson, 1994] D. Raychaudhuri y N. Wilson. “ATM-based transport architecture for multiservices wireless personal communication networks”. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, volumen 12, nº 8, páginas 1401–1414, 1994.
- [Robinson, 2004] S. Robinson. *Simulation: the practice of model development and use*. John Wiley & Sons, 2004.
- [Sachs et al., 2004] J. Sachs, L. Muñoz, R. Agüero, J. Choque, G. Koudouridis, R. Karimi, L. Jorgueski, J. Gebert, F. Meago, y F. Berggren. “Future wireless communication based on multi-radio access”. En *Proceedings of the Wireless World Research Forum 11, WWRF*. 2004.
- [Sallent, 2006] O. Sallent. “A perspective on radio resource management in B3G”. En *Wireless Communication Systems, 2006. ISWCS '06. 3rd International Symposium on*, páginas 30–34. 2006.
- [Sallent et al., 2007] O. Sallent, J. Pérez-Romero, R. Ljung, P. Karlsson, y A. Barbaresi. “Operator’s rat selection policies based on the fittingness factor concept”. En *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*, páginas 1–5. IEEE, 2007.
- [Sánchez et al., 2010] L. Sánchez, J. Lanza, J. Choque, y L. Muñoz. “Arquitectura de una entidad middleware para la gestión cognitiva de las comunicaciones en terminales multiradio”. En *Actas de las IX Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 17–24. 2010.
- [Sanz et al., 2003] R. Sanz, R. Agüero, L. Sánchez, J. Choque, y L. Muñoz. “Mejora de las prestaciones de la pila TCP/IP en entornos inalámbricos multisalto”. En *Actas de las IV Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL*, páginas 393–400. 2003.
- [Scalable Network Technologies, Inc., 2014] Scalable Network Technologies, Inc. “QualNet communications simulation platform”. 2014.
- [Song y Jamalipour, 2005] Q. Song y A. Jamalipour. “Network selection in an integrated wireless LAN and UMTS environment using mathematical modeling and computing techniques”. *Wireless Communications, IEEE*, volumen 12, nº 3, páginas 42–48, 2005.
- [Sun et al., 2001] J.-Z. Sun, J. Sauvola, y D. Howie. “Features in future: 4G visions from a technical perspective”. En *Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. IEEE*, volumen 6, páginas 3533–3537 vol.6. 2001.
- [Sun et al., 2009] Y. Sun, Y. Ge, J. Yuan, J. Zhou, S. Herborn, y D. Chen. “PAWES: A flow distribution algorithm based on priority and weight self-production”. En *Wireless Communications and Networking Conference, 2009. WCNC 2009. IEEE*, páginas 1–6. 2009.
- [Triantaphyllou, 2000] E. Triantaphyllou. *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Applied Optimization. Springer, 2000.

- [Van Nee, 2011] R. Van Nee. “Breaking the gigabit-per-second barrier with 802.11ac”. *Wireless Communications, IEEE*, volumen 18, nº 2, páginas 4–4, 2011.
- [Varga, 2001] A. Varga. “The OMNeT++ discrete event simulation system”. En *Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001)*. 2001.
- [Varga y Hornig, 2008] A. Varga y R. Hornig. “An overview of the OMNeT++ simulation environment”. En *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, página 60. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008.
- [Varshney, 2012] U. Varshney. “4G wireless networks”. *IT Professional*, volumen 14, nº 5, páginas 34–39, 2012.
- [Von Neumann y Morgenstern, 2007] J. Von Neumann y O. Morgenstern. *Theory of games and economic behavior (commemorative edition)*. Princeton university press, 2007.
- [Vorwerk et al., 2006] M. Vorwerk, S. Schuetz, R. Agüero, J. Choque, S. Schmid, M. Kleis, M. Kampman, y M. Erkoç. “Ambient Networks in practice: instant media services for users on the move”. En *Proceedings of the 2nd International IEEE/Create-Net Tridentcom*. 2006.
- [Wang y Kuo, 2013] L. Wang y G.-S. Kuo. “Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks: A tutorial”. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, volumen 15, nº 1, páginas 271–292, 2013.
- [Watters y Shepherd, 1994] C. Watters y M. A. Shepherd. “Shifting the information paradigm from data-centered to user-centered”. *Information Processing & Management*, volumen 30, nº 4, páginas 455–471, 1994.
- [Wireless Broadband Alliance, 2012] Wireless Broadband Alliance. “The iPass global mobile workforce report Q2 2012: Understanding mobility trends and mobile usage among business users”. 2012.
- [Wireless Broadband Alliance, 2013] Wireless Broadband Alliance. “Wireless broadband alliance industry report 2013: Global trends in public Wi-Fi”. 2013.
- [Xing y Venkatasubramanian, 2005] B. Xing y N. Venkatasubramanian. “Multi-constraint dynamic access selection in always best connected networks”. En *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2005. MobiQuitous 2005. The Second Annual International Conference on*. 2005.
- [Zeng et al., 1998] X. Zeng, R. Bagrodia, y M. Gerla. “GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks”. En *Parallel and Distributed Simulation, 1998. PADS 98. Proceedings. Twelfth Workshop on*, páginas 154–161. 1998.