

Universidad de Málaga  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación



TESIS DOCTORAL

Algoritmos de Reparto de Tráfico en Femtoceldas  
corporativas LTE

Autor:

JOSÉ MARÍA RUIZ AVILÉS

Directores:

MATÍAS TORIL GENOVÉS  
SALVADOR LUNA RAMÍREZ



Publicaciones y  
Divulgación Científica

AUTOR: José María Ruiz Avilés

 <http://orcid.org/0000-0001-5831-5484>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:

Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):

[Http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es)

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización  
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer  
obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de  
Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)

# Agradecimientos

Me doy cuenta, ahora que esta etapa llega a su fin, que no va a ser fácil encontrar una labor tan grata como la me ha mantenido ocupado estos años. Pero seguramente lo vea así, además de porque he encontrado mi vocación, por toda la gente que me ha acompañado estos años.

Por eso quiero agradecer su apoyo a todos mis compañeros, a Pablo e Isa que me recibieron con los brazos abiertos, y a todos los demás que fueron llegando después, en especial a Victor, Alex, Sergio, José Ángel, Rocio, Pablo y Antonio. Gracias a todos por estos años, por vuestra ayuda y por vuestra amistad.

Pero si a alguien tengo que agradecer mi tesis es a mis directores, Salva y Matías. No he podido tener mejores maestros para aprender este oficio.

Gracias Salva por tu ayuda y tu entusiasmo, siempre has sabido transmitirme el ánimo y optimismo necesarios. Es admirable tu capacidad para encontrar la mejor forma de explicar las cosas, haciendo que todo parezca sencillo. Eso, además de facilitar mi trabajo, se aprecia en el resultado.

Gracias Matías por todo, y sé que estas palabras se quedan cortas. Tu esfuerzo para mejorar continuamente, tu enorme dedicación y conocimiento y, sobre todo, tu pasión por esta profesión son, y serán, un ejemplo para mí.

Es un orgullo haberos tenido como directores.

Por último, quiero dedicar este trabajo a mi familia: a mis padres, a mi abuela, a mi familia sevillana, a Pablo, Alba e Iván, a los Ruices, a los Avileses, a Patri y a su familia y, por supuesto, a todos mis amigos, a los que no nombraré porque, por suerte, me extendería demasiado. En especial a mis padres, con ellos al lado todo es más sencillo. A mi hermano, con el que sé que puedo contar para cualquier cosa y eso me da seguridad. Y por último a Patri, porque estos meses me ha demostrado lo que ya sabía, que soy muy afortunado.

GRACIAS.

# Índice general

Resumen	I
Abstract	III
Lista de Acrónimos	V
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos del trabajo . . . . .	2
1.2 Metodología de trabajo . . . . .	4
1.3 Estructura de la memoria . . . . .	5
<b>2 Conceptos básicos</b>	<b>7</b>
2.1 Estándar LTE . . . . .	7
2.1.1 Arquitectura de una red LTE . . . . .	7
2.1.2 Capa física . . . . .	9
2.1.3 Capa de enlace . . . . .	11
2.1.4 Capa de red . . . . .	13
2.2 Redes autoorganizadas . . . . .	15
2.2.1 Autoconfiguración . . . . .	16
2.2.2 Autooptimización . . . . .	17
2.2.3 Autocuración . . . . .	19
2.3 Femtoceldas . . . . .	20
2.3.1 Escenarios de uso . . . . .	21
2.3.2 Arquitectura de red . . . . .	22
2.3.3 Modos de acceso . . . . .	23
2.3.4 Movilidad de usuario . . . . .	25
2.3.5 SON en femtoceldas . . . . .	26
2.4 Conclusiones . . . . .	27
<b>3 Técnicas de reparto de tráfico</b>	<b>29</b>
3.1 Estado de la investigación y la tecnología . . . . .	29
3.2 Formulación del problema . . . . .	31
3.2.1 Congestión en la red de acceso . . . . .	31
3.2.2 Limitaciones del reparto de tráfico en LTE . . . . .	35
3.3 Diseño de técnicas de reparto de tráfico para femtoceldas LTE . . . . .	42
3.3.1 Estructura general de los algoritmos . . . . .	42
3.3.2 Implementación de los controladores . . . . .	45
3.4 Pruebas . . . . .	51
3.4.1 Metodología experimental . . . . .	52
3.4.2 Resultados . . . . .	64
3.5 Conclusiones . . . . .	81

<b>4</b>	<b>Posicionamiento de femtoceldas</b>	<b>83</b>
4.1	Estado de la investigación y la tecnología . . . . .	84
4.2	Formulación del problema . . . . .	86
4.2.1	Mínima pérdida de trayecto media . . . . .	87
4.2.2	Máxima peor calidad de conexión . . . . .	87
4.2.3	Máxima calidad de conexión media . . . . .	88
4.2.4	Máximo solapamiento entre celdas . . . . .	88
4.3	Diseño de estrategias de posicionamiento de femtoceldas . . . . .	89
4.3.1	Metodología de análisis . . . . .	89
4.3.2	Resultados del análisis . . . . .	92
4.4	Pruebas . . . . .	100
4.4.1	Metodología experimental . . . . .	101
4.4.2	Resultados . . . . .	104
4.5	Conclusiones . . . . .	110
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>113</b>
5.1	Principales contribuciones . . . . .	113
5.2	Líneas futuras . . . . .	116
5.3	Publicaciones . . . . .	118
<b>A</b>	<b>Anexo: Herramienta de simulación</b>	<b>123</b>
A.1	Estructura básica . . . . .	123
A.1.1	Escenario de simulación . . . . .	123
A.1.2	Modelo de movilidad de usuario . . . . .	124
A.1.3	Distribución espacial del tráfico . . . . .	126
A.1.4	Modelo de servicio . . . . .	127
A.2	Capa física . . . . .	127
A.2.1	Modelo de propagación . . . . .	127
A.2.2	Modelo de desvanecimiento rápido . . . . .	129
A.3	Capa de enlace . . . . .	131
A.3.1	Cálculo de SIR . . . . .	131
A.3.2	Esquema HARQ . . . . .	134
A.3.3	Adaptación del enlace . . . . .	134
A.3.4	Asignación de recursos . . . . .	135
A.4	Capa de red . . . . .	136
A.4.1	Control de admisión . . . . .	136
A.4.2	Algoritmos de traspaso . . . . .	136

# Resumen

En las redes de comunicaciones móviles actuales, la mayor parte de la demanda de tráfico se genera en ubicaciones de interior, donde las condiciones de cobertura son deficientes. Para solventar este problema, se ha propuesto el uso de redes de femtoceldas. Las femtoceldas, también conocidas como estaciones base de uso doméstico, son estaciones base de pequeño tamaño que se instalan en entornos residenciales o comerciales, de manera aislada o en grupos, para mejorar la cobertura móvil en interiores.

El despliegue masivo de femtoceldas dificulta sobremanera la gestión de la red, dado que la complejidad del entorno radio de interior y el elevado número de femtoceldas impiden un proceso de planificación exhaustivo por parte del operador. Es en este tipo de escenarios heterogéneos donde el uso de técnicas de redes auto-organizadas (Self-Organizing Network, SON) durante la operación de la red aporta mayores beneficios.

Uno de los problemas más frecuentes en las redes de femtoceldas corporativas es la congestión de tráfico causada por la distribución irregular de usuarios. Estos problemas pueden resolverse mediante técnicas de balance de carga, que se ha identificado como uno de los principales casos de uso de SON en redes Long Term Evolution (LTE). Aunque este problema se ha estudiado ampliamente para redes de macroceldas y escenarios exteriores, las redes de femtoceldas LTE en entornos interiores presentan características completamente distintas, que hacen necesaria la búsqueda de nuevas soluciones.

En esta tesis se ha realizado un trabajo de análisis, investigación y experimentación para desarrollar soluciones robustas, eficaces y automáticas para la congestión en redes de femtoceldas corporativas LTE. Las soluciones propuestas incluyen métodos automáticos de optimización y planificación de red. Por un lado, se han diseñado métodos de ajuste de parámetros radio de las femtoceldas, como los márgenes de traspaso y la potencia de transmisión, para desplazar tráfico desde femtoceldas sobrecargadas hacia femtoceldas infrautilizadas. Por otro lado, se ha definido un conjunto de reglas para determinar el emplazamiento de las femtoceldas que permita que los métodos de balance de carga funcionen de manera eficaz. Todos estos métodos se han validado con un simulador dinámico de nivel de red que modela un escenario de oficinas.



# Abstract

In current mobile communication networks, most of the traffic demand is created in indoor locations, where coverage conditions are inadequate. The use of femtocells has been proposed as a solution to this problem. Femtocells, also known as domestic base stations, are small base stations usually located in residential or commercial environments, alone or in groups, with the aim of improving indoor mobile coverage.

Massive deployment of femtocells, together with the complexity of the indoor radio environment, makes it very difficult for operators to perform an exhaustive network planning indoors. Thus, the use of Self-Organizing Networks (SON) techniques during network operation can provide important benefits in these scenarios.

One of the most common problems in corporate femtocell networks is traffic congestion due to irregular user distribution. The congestion problem can be solved by means of load balancing techniques, which have been identified as one of the main SON use cases in Long Term Evolution (LTE). Although load balancing has been widely analyzed in macrocellular networks and outdoor scenarios, femtocell networks in indoor environments present very different characteristics, justifying the development of new solutions.

The goal of this PhD thesis is to develop robust, efficient and automatic solutions for the congestion problem in corporate LTE femtocell networks. The proposed solutions include both network optimization and network planning methods. Firstly, self-optimization methods to tune femtocell radio parameters, such as handover margins and femtocell transmission power, are designed to share traffic from overloaded femtocells to underutilized femtocells. Secondly, a set of rules for selecting the best femtocell placement have been defined to improve the effectiveness of load balancing methods. All these methods are validated in a dynamic system-level simulator implementing a realistic office scenario.





# Lista de Acrónimos

<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>AMC</b>	Adaptative Modulation and Coding
<b>APP</b>	Antenna Placement Problem
<b>ASL</b>	Average SINR Layout
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BLER</b>	Block Error Rate
<b>BR</b>	Blocking Ratio
<b>CDMA</b>	Code Division Multiple Access
<b>CDR</b>	Connection Dropping Ratio
<b>CL</b>	Coverage Layout
<b>CQI</b>	Channel Quality Indicator
<b>CR</b>	Cell Reselection
<b>CSG</b>	Closed Subscriber Group
<b>CTS</b>	Combined Traffic Sharing
<b>eNB</b>	evolved Node B
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>EPS</b>	Evolved Packet System
<b>E-UTRAN</b>	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform

<b>FL</b>	Floor Loss
<b>GERAN</b>	GSM EDGE Radio Access Network
<b>GSM</b>	Global System for Mobile communications
<b>HARQ</b>	Hybrid Automatic Repeat-reQuest
<b>HeNB</b>	Home eNodeB
<b>HeNB GW</b>	Home eNB Gateway
<b>HFR</b>	HO Failure Ratio
<b>HO</b>	Handover
<b>HOM</b>	HandOver Margin
<b>HOR</b>	Handover Ratio
<b>HSS</b>	Home Subscriber Server
<b>ICIC</b>	Inter-Cell Interference Coordination
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>LDR</b>	Low Dominance Ratio
<b>LOS</b>	Line-Of-Sight
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>MCS</b>	Modulation and Coding Scheme
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>MTS</b>	Margin Traffic Sharing
<b>MTSAC</b>	Margin Traffic Sharing with Adaptive Constraint
<b>MTSFC</b>	Margin Traffic Sharing Fixed Constrained
<b>NLOS</b>	Non-Line-Of-Sight
<b>NP-hard</b>	Non-deterministic Polynomial-time hard
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
<b>OR</b>	Outage Ratio
<b>OrL</b>	Original Layout
<b>OSS</b>	Operational Support System
<b> OvL</b>	Overlapping Layout

<b>PAPR</b>	Peak to Average Power Ratio
<b>PBGT</b>	Power BudGeT
<b>PCI</b>	Physical Cell Identity
<b>PCRF</b>	Policy and Charging Rules Function
<b>PDN</b>	Packet Data Network
<b>PDSCH</b>	Physical Downlink Shared Channel
<b>P-GW</b>	Packet Data Network Gateway
<b>PIRE</b>	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
<b>PL</b>	PathLoss
<b>PRB</b>	Physical Resource Block
<b>PTS</b>	Power Traffic Sharing
<b>PUSCH</b>	Physical Uplink Shared Channel
<b>RAC</b>	Radio Admission Control
<b>RE</b>	Resource Element
<b>RRC</b>	Radio Resource Control
<b>RRM</b>	Radio Resource Management
<b>RSP</b>	Reference Signal Primary
<b>RSRP</b>	Reference Signal Received Power
<b>RSRQ</b>	Reference Signal Recieved Quality
<b>RSS</b>	Reference Signal Secondary
<b>SA</b>	Simulated Annealing
<b>SC-FDMA</b>	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
<b>SGSN</b>	Serving GPRS Support Node
<b>S-GW</b>	Serving Gateway
<b>SINR</b>	Signal to Interference plus Noise Ratio
<b>SIR</b>	Signal to Interference Ratio
<b>SF</b>	Slow Fading
<b>SON</b>	Self Organizing Networks

<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TS</b>	Tabu Search
<b>TTI</b>	Transmission Time Interval
<b>TTT</b>	Time To Trigger
<b>UE</b>	User Equipment
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunications System
<b>UTRAN</b>	UMTS Terrestrial Radio Access Network
<b>UUR</b>	Unsatisfied User Ratio
<b>VoIP</b>	Voice over IP
<b>WCDMA</b>	Wideband Code Division Multiple Access
<b>WiMAX</b>	Wireless Interoperability for Microwave Access
<b>WSL</b>	Worst-case SINR Layout

# Capítulo 1

## Introducción

En los últimos años, la demanda de tráfico en las redes de comunicaciones móviles ha crecido de manera exponencial, fruto de la generalización del uso de internet y de las aplicaciones a través del terminal móvil. Este crecimiento ha obligado a operadores y fabricantes a realizar un esfuerzo por mejorar la tecnología, para satisfacer las crecientes expectativas que el usuario tiene puestas en su terminal móvil.

Por el contrario, los beneficios de las operadoras móviles se han reducido significativamente, como resultado de los nuevos modelos de negocio, donde el aumento de consumo de datos no conlleva un mayor beneficio para las operadoras. En este contexto, el éxito de las operadoras a medio y largo plazo depende en gran medida de su habilidad para ofrecer una calidad de servicio adecuada a un menor coste. Para ello, es imprescindible reducir la inversión en equipamiento, sacando el máximo partido de los recursos disponibles, y minimizar el coste de operación. Los recientes avances en las tecnologías de acceso radio han conseguido, hasta el momento, sostener el aumento de la demanda de tráfico. El despliegue de las primeras redes comerciales *Long Term Evolution* (LTE) ha permitido aumentar las tasas de transmisión ofrecidas por tecnologías maduras, como *Global System for Mobile communications* (GSM) y *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS). Sin embargo, estas mejoras se prevén insuficientes, por lo que se requieren nuevas formas de incrementar la capacidad de la red.

Al mismo tiempo, la convergencia de las tecnologías de acceso fijo y móvil ha provocado un cambio en la mezcla de servicios y el origen del tráfico en redes móviles. Estudios recientes demuestran que más de un 60 % del tráfico celular se origina hoy en día en interiores. Sin embargo, alrededor del 40 % de los edificios no tienen condiciones de cobertura adecuadas [1, 2, 3]. Para resolver este problema, se ha propuesto el uso de estaciones base domésticas o femtoceldas. Las femtoceldas son estaciones base de potencia limitada que emplean las bandas de frecuencias propiedad del operador para comunicarse con el usuario, y utilizan Internet como red de retorno [4]. El despliegue masivo de redes de femtoceldas tiene importantes ventajas, comparado con la aproximación más común de aumentar el número de macroceldas. Desde el punto de vista del operador, se reducen los costes asociados al despliegue de macroceldas y se aumenta la capacidad de la red, gracias a la

reutilización del espectro y la descarga de tráfico en las macroceldas. Al mismo tiempo, se reduce la distancia entre emisor y receptor, mejorando la eficacia de la comunicación e incrementando el tiempo de vida de la batería del terminal.

Lamentablemente, la coexistencia de tecnologías y servicios en estas redes heterogéneas complica las tareas de gestión realizadas por el operador. El elevado número de estaciones base, y la complejidad y variabilidad de los entornos interiores, impide llevar a cabo un proceso de planificación cuidadoso. Es en estos escenarios donde la necesidad de simplificar las tareas de gestión de red es mayor [5]. Ello justifica la atención prestada por foros industriales y organismos de estandarización a las redes autoorganizadas (*Self Organizing Networks*, SON) en este ámbito [6][7]. Bajo el término SON, se agrupan todas aquellas técnicas que permiten realizar de forma autónoma las tareas de configuración, operación y mantenimiento de la red, sin intervención del operador [8][9]. Automatizando aquellos procesos que son complejos o costosos, se pretende reducir los costes de despliegue y operación, al tiempo que se evitan los errores humanos y se mejora el rendimiento de la red.

Uno de los principales casos de uso de SON es el balance de carga entre celdas [6][7][10]. En una red celular, es habitual encontrar celdas sobrecargadas de tráfico próximas a celdas infrautilizadas, como consecuencia de la distribución irregular del tráfico en el espacio y en el tiempo. A largo plazo, estos fenómenos de congestión se solventan ampliando los recursos de la red y añadiendo nuevas funcionalidades. Sin embargo, a corto plazo, la única solución pasa por aplicar técnicas de gestión del tráfico que permitan modificar de manera flexible y dinámica el área de servicio de cada celda. Existen numerosos estudios sobre el reparto de tráfico en macroceldas y microceldas (p.ej., [11][12]), pero pocos estudios han extendido el análisis a redes de femtoceldas en oficinas. Estos escenarios corporativos presentan diversas peculiaridades que justifican la necesidad de un análisis diferenciado, como son: a) una geometría tridimensional, donde las celdas vecinas pueden estar situadas en cualquier posición alrededor de la celda servidora, lo que incrementa los niveles de interferencia, b) un patrón de movilidad de usuario diferente al de los usuarios en exteriores, c) una distribución de usuarios que varía enormemente en el espacio (p.ej., cafetería) y en el tiempo (p.ej., hora de llegada, hora del almuerzo), y d) un esquema de acceso abierto, que permite el reparto de tráfico entre celdas, a diferencia de las femtoceldas residenciales estudiadas en la bibliografía, donde el esquema de acceso es cerrado.

## 1.1. Objetivos del trabajo

El principal objetivo de esta tesis es el desarrollo de métodos de planificación y optimización para el alivio de congestión en redes corporativas de femtoceldas LTE.

Una primera estrategia es el ajuste de parámetros durante la fase de operación para redistribuir el tráfico entre femtoceldas vecinas mediante la modificación de

sus áreas de servicio. Los parámetros ajustados son: a) la potencia de transmisión de la femtocelda, que determina el nivel de señal recibido por el usuario, y b) los márgenes de traspaso, que controlan cuándo un usuario cambia de femtocelda en función del nivel de señal recibido de cada femtocelda. Haciendo un ajuste adecuado de estos parámetros, es posible desplazar usuarios desde femtoceldas con problemas de congestión de tráfico hacia femtoceldas menos cargadas.

En esta línea de trabajo, las contribuciones de esta tesis son:

1. un conjunto de algoritmos de ajuste de parámetros que, a partir de estadísticas de rendimiento de red, permiten el reparto de tráfico entre femtoceldas LTE vecinas sin deteriorar la calidad de conexión en exceso;
2. un simulador dinámico de nivel de sistema que modela un edificio de oficinas con femtoceldas LTE, apropiado para validar algoritmos de optimización de red por su baja carga computacional;
3. un análisis exhaustivo del rendimiento de diversas técnicas de reparto de tráfico en redes LTE de macroceldas y/o femtoceldas, basado en simulaciones de escenarios realistas o pruebas de campo; y
4. un nuevo indicador, construido a partir de trazas de llamada, que mide la degradación causada por el cambio de los márgenes de traspaso durante el reparto de tráfico en una red LTE.

Una estrategia complementaria al ajuste de parámetros es la selección de un emplazamiento adecuado para las femtoceldas durante la fase de planificación, que mejore la eficacia de los métodos de alivio de congestión anteriormente descritos. Con esta estrategia de planificación, se pretende potenciar la capacidad de las técnicas de reparto de tráfico para hacer frente a los cambios de la distribución espacial de usuarios que se producen en una oficina a lo largo del día.

En esta segunda línea de trabajo, las contribuciones de esta tesis son:

1. un indicador que cuantifica el grado de solapamiento entre femtoceldas vecinas, para estimar a priori la efectividad de las técnicas de reparto de tráfico en LTE en interiores;
2. un conjunto de reglas básicas para posicionar femtoceldas en un edificio de oficinas atendiendo a criterios de cobertura, calidad de conexión y solapamiento, que permiten optimizar el funcionamiento de las técnicas de alivio de congestión propuestas;
3. un análisis detallado del rendimiento de diversas técnicas de alivio de congestión con distintos esquemas de posicionamiento de femtoceldas, que muestra el impacto de la ubicación de las femtoceldas en la capacidad de reparto de tráfico.



Los métodos e indicadores propuestos en esta tesis se basan en información actualmente disponible en el sistema de gestión de red, y que proviene principalmente de contadores que computan el número de veces que se repite un determinado evento. Por ello, han sido concebidos para ser integrados en las herramientas de optimización de red que forman parte del sistema de soporte a las operaciones (*Operational Support System*, OSS) de una red celular. Además, la baja carga computacional de los métodos propuestos permite su implementación de forma distribuida en las femtoceldas, siempre que se dote a éstas de una interfaz de comunicación entre ellas. Aunque en esta tesis se ha usado el término femtoceldas, recientemente se ha acuñado el término celdas pequeñas o *Small Cells* como un término más amplio que engloba a estas y otras celdas de características similares [13]. Las celdas pequeñas hacen referencia a celdas de corto alcance que operan en frecuencias bajo licencia de los operadores móviles. Se agrupan en este término a celdas pequeñas en entornos residenciales, en entornos corporativos, en estaciones de metro o en zonas rurales. Por tanto, puede decirse, que las técnicas propuestas en esta tesis pueden aplicarse a celdas pequeñas y, en este caso, en entornos corporativos.

## 1.2. Metodología de trabajo

Las tareas realizadas en esta tesis se describen a continuación:

1. El trabajo se inicia con un estudio del estado de la técnica y la tecnología de la gestión del tráfico y la gestión de recursos radio en LTE. Dicho estudio permite identificar las técnicas clásicas de reparto de tráfico descritas en la bibliografía, entre las que se encuentran la modificación de potencia de las estaciones base y el balance de carga mediante traspasos.
2. Un análisis teórico preliminar permite identificar las limitaciones de los algoritmos de reparto de tráfico basados en traspaso en LTE. Estas limitaciones se confirman en una prueba de campo de un algoritmo clásico de balance de tráfico mediante traspasos en una red LTE comercial.
3. Una vez identificadas las limitaciones del balance de tráfico en LTE, se diseñan los algoritmos de reparto de tráfico entre femtoceldas en escenarios corporativos, que son la principal contribución de esta tesis. En la propuesta se incluyen diversas variantes que ajustan, de forma independiente o conjunta, los márgenes de traspaso y la potencia de transmisión de las femtoceldas. Todas estas variantes se implementan mediante controladores de lógica difusa para simplificar su descripción.
4. Para la validación de los algoritmos, se define como caso de uso el alivio de congestión en un edificio de oficinas de varias plantas. Al mismo tiempo, se desarrolla una herramienta de simulación que incluye un modelo de movilidad de usuario de interiores y un modelo de propagación interior-exterior.

Con dicha herramienta, se lleva a cabo una campaña de simulaciones para validar el rendimiento de los algoritmos propuestos.

5. La realización de estas pruebas pone de manifiesto que la posición de las femtoceldas influye enormemente en los algoritmos de reparto de tráfico en interiores. Esta evidencia justifica el estudio de estrategias de posicionamiento de femtoceldas realizado posteriormente en esta tesis. Dicho estudio se inicia con los criterios de selección de emplazamiento descritos en la bibliografía para redes móviles.
6. Ante la ausencia de un criterio de posicionamiento de estaciones base que permita medir la capacidad del reparto de tráfico, se diseña un indicador para tal fin. De esta forma, al posicionar las femtoceldas de modo que se optimice dicho indicador, se obtiene un esquema de posicionamiento robusto frente a los posibles problemas de congestión en interiores. La evaluación de diferentes esquemas de posicionamiento de femtoceldas realizada con este indicador en un simulador estático permite definir un conjunto de recomendaciones para ubicar femtoceldas en redes corporativas, que pueden ser útiles para el operador en la fase de planificación.
7. Las estrategias de posicionamiento de femtoceldas propuestas se validan midiendo la mejora de rendimiento obtenida en las técnicas de reparto de tráfico sobre el simulador dinámico.

### 1.3. Estructura de la memoria

En esta memoria se distinguen dos partes diferenciadas, dedicadas a las técnicas de reparto de tráfico y las estrategias de posicionamiento de femtoceldas. Ambos problemas se tratan en capítulos separados, que comparten la misma estructura por claridad.

Tras este primer capítulo, en el Capítulo 2 se presentan los conceptos necesarios para contextualizar este trabajo. En una primera sección se introducen los principios básicos de funcionamiento de la tecnología LTE, describiendo su arquitectura de red y las principales características de la capa física, de enlace y de red. Se incluye en este análisis la descripción del algoritmo estandarizado de traspaso, como elemento central de esta tesis. En una segunda sección se define el concepto de red autoorganizada y sus funcionalidades. Para finalizar el capítulo, se describen las redes de femtoceldas, presentando su arquitectura y analizando sus principales características.

El Capítulo 3 se centra en las técnicas de reparto de tráfico para redes corporativas de femtoceldas LTE. En primer lugar, se realiza un análisis preliminar del estado de la investigación de las técnicas de reparto de tráfico en diferentes tecnologías, formulando el problema a resolver. Seguidamente se presentan los algoritmos de reparto de tráfico propuestos en esta tesis, junto con los controladores

que los implementan. A continuación se describen los experimentos realizados para validar estos algoritmos, y las conclusiones obtenidas de los resultados.

En el Capítulo 4 se presentan las estrategias de posicionamiento de femtoceldas en entornos corporativos. Al igual que en el capítulo anterior, se comienza con un análisis detallado del estado de la investigación sobre posicionamiento de estaciones base en redes móviles. En segundo lugar se definen diversos criterios que permiten después definir unas reglas básicas para el posicionamiento de femtoceldas. A continuación se muestran los experimentos realizados, cuyo principal objetivo es comprobar el impacto del posicionamiento de femtoceldas en las técnicas de reparto de tráfico. Por último, se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos. En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones generales y líneas futuras de extensión del trabajo realizado en esta tesis. Además, se presentan las publicaciones y patentes elaboradas a lo largo de este estudio, que describen las aportaciones principales de esta tesis.

En el Anexo A se describe la herramienta de simulación desarrollada como parte del trabajo de esta tesis, y que ha servido de plataforma de simulación para todos los experimentos realizados.

## Capítulo 2

# Conceptos básicos

Este capítulo resume los conocimientos básicos necesarios para comprender el resto del trabajo. Se pretende contextualizar el trabajo realizado describiendo las tecnologías donde se aplican las soluciones propuestas en esta tesis. Para ello, en la Sección 2.1 se introduce primero el estándar de comunicaciones móviles LTE, prestando especial atención a su interfaz radio. A continuación, en la Sección 2.2 se presenta una de las funcionalidades más importantes de las redes LTE, como es su capacidad de organización automática (SON). En la Sección 2.3 se describen las redes de femtoceldas, para las que se han concebido los métodos descritos en esta tesis. Por último, en la Sección 2.4 se presentan las conclusiones de este capítulo.

### 2.1. Estándar LTE

En esta sección se presentan los elementos que componen un sistema LTE. Primero se describe la arquitectura de un sistema LTE, para mostrar después las funciones de las distintas capas del sistema.

#### 2.1.1. Arquitectura de una red LTE

Un sistema de comunicaciones móviles celular está constituido principalmente por tres elementos básicos:

- **Terminal móvil**, que es el dispositivo que permite al usuario acceder a la red de acceso para la utilización de los servicios mediante la interfaz radio.
- **Red de acceso**, que proporciona la conexión entre el equipo de usuario y los equipos de la red troncal, y es la encargada de gestionar de manera eficiente el uso de los recursos radio disponibles.
- **Red troncal**, que se encarga de la gestión de la movilidad, el control de acceso, la gestión de las conexiones de los usuarios y la interconexión con otras redes.

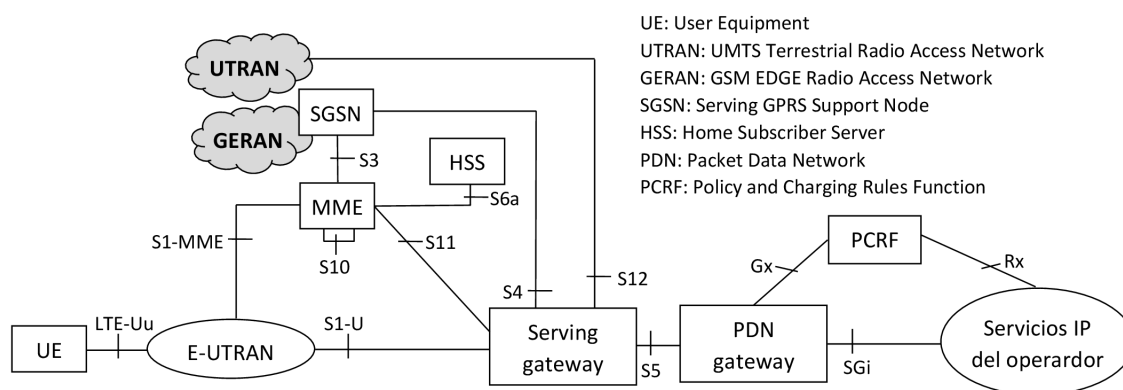


Figura 2.1: Estructura de la red troncal de LTE [14].

En el caso de una red LTE, la red de acceso radio se conoce como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) y la red troncal se conoce como *Evolved Packet Core* (EPC). La combinación de la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC dan lugar al sistema completo de una red LTE, también conocido como *Evolved Packet System* (EPS). Una de las principales diferencias del sistema LTE con los sistemas anteriores, GSM y UMTS, es que en LTE la red troncal utiliza solamente mecanismos de conmutación de paquetes para soportar todos los tipos de servicios, dando lugar a una red en la que todos los servicios utilizan el protocolo *Internet Protocol* (IP).

La Figura 2.1 muestra los elementos de la red troncal EPC y las interfaces entre los mismos, descritos en el estándar [14]. Estos elementos son:

- *Mobility Management Entity* (MME). Este elemento es la entidad principal del plano de control de la red LTE encargada de gestionar el acceso de los terminales a través de la red de acceso E-UTRAN. Cada entidad MME sirve a un conjunto de estaciones base y a los usuarios conectados a ellas. Entre las principales funciones de la entidad MME se encuentran la autenticación y autorización del acceso de los usuarios, la gestión de la señalización necesaria para el envío de paquetes IP entre los equipos de usuario y la red externa, la gestión de la movilidad de los usuarios en modo ocioso (es decir, sin conexión activa) y la señalización para la movilidad de usuarios entre distintas redes del *3rd Generation Partnership Project* (3GPP).
- *Serving Gateway* (S-GW). Este elemento actúa de enlace entre la red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC en el plano de usuario. Como ocurre con la MME, cada usuario tiene una entidad S-GW asignada. La entidad S-GW es el punto de referencia en la red troncal para el usuario cuando éste se mueve entre distintas estaciones base. Además, es el elemento encargado del encaminamiento de la información del usuario tanto de subida (hacia la red troncal) como de bajada (hacia las estaciones base).

- *Packet Data Network Gateway* (P-GW). Esta entidad es la encargada de proporcionar conectividad entre la red LTE y las redes externas. Además actúa como punto de referencia para la gestión de la movilidad entre LTE y otras redes distintas de las del 3GPP. Esta entidad es la encargada también de proporcionar al terminal una dirección IP que podrá ser utilizada desde el exterior, de aplicar las reglas de uso de la red y el control de tarificación.

El único elemento de la red de acceso es el denominado *evolved Node B* (eNB), que constituye la estación base de E-UTRAN. En este elemento se integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de lo que ocurría en las anteriores redes (GSM y UMTS), donde parte de la inteligencia de la red de acceso se ubicaba en los controladores de estaciones base. El eNB es el elemento encargado de la transmisión de los datos de usuario hacia y desde los terminales móviles, o *User Equipment* (UE), además de la transmisión de los mensajes de señalización necesarios. Además, el eNB es la entidad que gestiona los recursos radio y, por tanto, quien lleva a cabo todas las funciones de control de admisión, control de movilidad, asignación dinámica de recursos y control de interferencia.

El trabajo presentado en esta memoria afecta exclusivamente a las funcionalidades de la red de acceso de LTE. Por esta razón, en lo sucesivo en esta memoria, sólo se hará referencia a las características de E-UTRAN.

### 2.1.2. Capa física

El nivel físico de la interfaz aire del sistema LTE se basa en la utilización de la técnica de acceso múltiple *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) en el enlace descendente (desde el eNB hasta el UE) y *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) en el enlace ascendente (desde el UE hasta el eNB).

La técnica de transmisión OFDMA utiliza un conjunto de subportadoras multiplexadas y ortogonales entre sí para la transmisión simultánea de un conjunto de símbolos. Gracias a la propiedad de ortogonalidad entre portadoras es posible separar los distintos símbolos en recepción.

La técnica OFDMA posee una característica que provoca que no sea una técnica idónea de transmisión para el enlace ascendente, que es su elevado factor de cresta (*Peak to Average Power Ratio*, PAPR). Dicho parámetro mide la relación entre la potencia instantánea de la señal transmitida respecto de la potencia media. Cuanto mayor es su valor, menor es la eficiencia de los amplificadores de potencia del transmisor, entendiendo dicha eficiencia como la relación entre la potencia transmitida respecto a la potencia consumida. Por esta razón, en las redes LTE, la técnica de acceso múltiple utilizada en el enlace ascendente no es OFDMA, sino SC-FDMA.

La técnica de acceso múltiple SC-FDMA es una técnica similar a OFDMA, pero realizando un procesamiento previo de los símbolos que se van a transmitir, re-

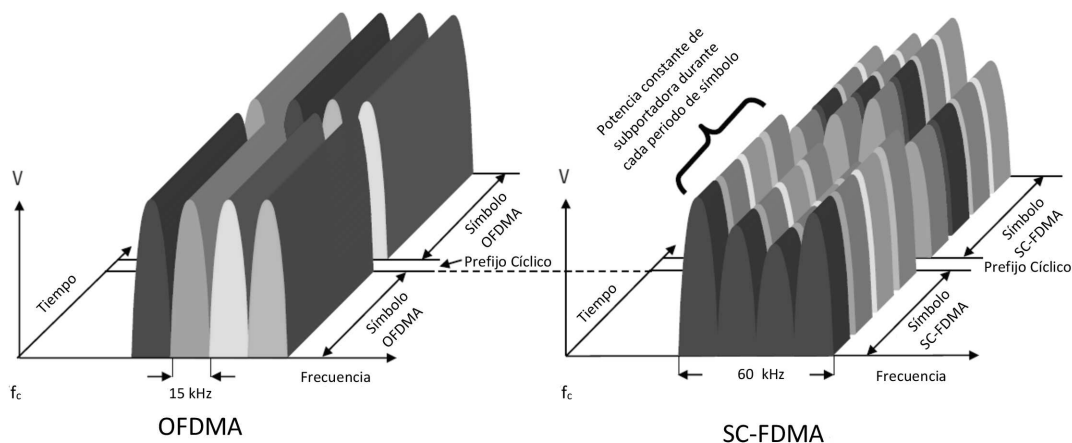


Figura 2.2: Comparación entre las técnicas OFDMA y SC-FDMA [16].

duciéndose así las variaciones de potencia instantánea. De esta manera, se consigue una técnica de transmisión de portadora única, pero que tiene las características de asignación de frecuencias flexible y la robustez frente a la propagación multi-camino propias de la técnica OFDMA [15].

En la Figura 2.2 se muestra una comparación gráfica de las técnicas OFDMA y SC-FDMA. Como puede observarse, en OFDMA los símbolos se transmiten en distintas subportadoras de manera simultánea. Por el contrario, en SC-FDMA los símbolos se transmiten de manera consecutiva ocupando todas las subportadoras, sin que por ello varíe el tamaño del símbolo definido.

La separación entre subportadoras es fija e igual a 15kHz. Un *Resource Element* (RE) es la unidad mínima definida como recurso radio y está constituido por una subportadora durante un tiempo de símbolo ( $T_s$ ). La planificación de recursos se realiza cada *Transmission Time Interval* (TTI), que equivale a 1 ms. Un *Physical Resource Block* (PRB) es la unidad de recurso mínima de asignación, consistente en un ancho de banda de 180 kHz (12 subportadoras) y una duración de 0.5 ms (un *slot* o  $7 \cdot T_s$ ), y contiene 84 REs (12 x 7). El número de PRBs disponibles en un sistema LTE varía entre 5 y 100 dependiendo del ancho de banda de sistema, cuyo valor varía entre 1.4MHz y 20MHz [17].

Además de la información de usuario, en los PRB se incluyen señales de referencia (o pilotos) que permiten implementar mecanismos de sincronización, realizar estimas del canal y obtener medidas de calidad en el enlace descendente. Estas señales de referencia, la señal de referencia primaria (*Reference Signal Primary*, RSP) y la señal de referencia secundaria (*Reference Signal Secondary*, RSS), se transmiten en frecuencias y símbolos concretos dentro de un PRB, tal como se indica en la Figura 2.3.

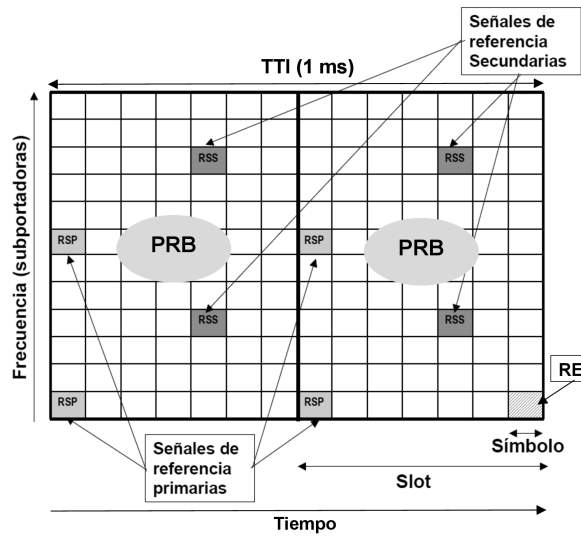


Figura 2.3: Ubicación de las señales de referencia en una subtrama con 12 subportadoras [15].

### 2.1.3. Capa de enlace

Entre las funcionalidades de la capa de enlace de un sistema LTE se pueden destacar la retransmisión híbrida de paquetes, la función de adaptación del enlace y la asignación dinámica de recursos. Estas tres funciones trabajan de manera conjunta para conseguir la mejor eficiencia posible en el uso del canal y, con ello, los mejores valores de tasa de transmisión para los usuarios.

La función de retransmisión híbrida de paquetes (*Hybrid Automatic Repeat-request*, HARQ) incluye mecanismos de corrección de errores mediante retransmisiones basados en el incremento de la redundancia. Dichos mecanismos permiten que, en el caso de que la recepción no sea correcta con la información de redundancia incluida en la primera transmisión, se realicen retransmisiones de información de redundancia adicional. Este proceso se repite hasta que se consigue corregir los errores en recepción o se completa el envío de toda la información de redundancia disponible. Este mecanismo de retransmisión incremental permite optimizar el uso eficiente de los recursos radio disponibles.

La función de adaptación dinámica del enlace (*Adaptive Modulation and Coding*, AMC) tiene como objetivo seleccionar el esquema de modulación y codificación (*Modulation and Coding Scheme*, MCS) más adecuado para cada usuario según las condiciones instantáneas del canal. Para ello, es necesario realizar una estimación de la calidad del canal radio que percibe cada usuario. A partir de dicha estima, la función AMC selecciona un MCS para cada usuario. En el enlace descendente, los posibles esquemas de modulación que se pueden utilizar son QPSK, 16-QAM y 64-QAM, que se corresponden, respectivamente, con 2, 4 y 8 bits por símbolo. Dentro de cada esquema de modulación, existen diferentes esquemas de codificación con mayor o menor robustez, es decir, que incluyen más o



menos información de redundancia en cada símbolo. La combinación de esquema de modulación y codificación (es decir, MCS) determina la tasa binaria máxima obtenida por el usuario.

El objetivo perseguido por la función AMC es asignar las mayores tasas binarias de transmisión a los usuarios que estén experimentando mejores condiciones de canal en ese momento. A aquellos usuarios que estén experimentando baja calidad en el enlace, se les asignan esquemas de modulación más robustos, aunque esto suponga una tasa de transmisión más baja. Como norma general, el MCS que se asigna a un usuario es aquél que garantice una calidad mínima de la comunicación, expresada en términos de tasa de error de bit (*Bit Error Rate, BER*) máxima permitida.

La función de asignación dinámica de recursos o *scheduling* realiza la asignación de los recursos radio disponibles a los distintos usuarios cada TTI (1 ms). Dicha asignación implica decidir qué usuarios transmiten y cuáles no y con qué recursos de la interfaz radio (es decir, frecuencia y tiempo). La unidad mínima de asignación se corresponde con un bloque de 180 kHz de ancho de banda (12 portadoras) y un intervalo temporal de 0.5 ms (es decir, un slot o ranura temporal), conocido como PRB.

La entidad que realiza el proceso de asignación (*scheduler*) trata de asignar los recursos radio al usuario que consiga un uso más eficiente de los mismos, garantizando, en la medida de lo posible, una cierta equidad entre usuarios. Con ello, se pretende aprovechar las variaciones rápidas del canal debidas a la propagación multicamino típicas de la propagación terrestre. Dichas variaciones causan que cada usuario presente condiciones de canal distintas, dependiendo de la frecuencia y el instante de tiempo que le son asignados. Esto permite explotar lo que se denomina como principio de diversidad multiusuario. Según este principio, en un sistema con múltiples usuarios y una planificación dinámica de los recursos adecuada, es posible transmitir más información en un canal con propagación multicamino que en un canal sin propagación multicamino, para el mismo nivel medio de potencia recibida [18].

La variación en las condiciones del canal en cada PRB no solo se debe a la propagación multicamino, sino también a la variabilidad de la interferencia recibida en cada PRB desde las celdas vecinas. Recibir o no interferencia desde una celda vecina depende directamente de si la asignación de recursos llevada a cabo en la misma produce una colisión radio entre ambas. En consecuencia, el *scheduler* es el responsable de evitar en la medida de lo posible estas colisiones radio, que son la principal fuente de interferencia en LTE.

Cabe resaltar que en LTE la reutilización del espectro es completa y, por tanto, la colisión radio puede producirse con cualquier celda vecina. A causa de esto, cuando la carga en la red es muy alta, la probabilidad de colisión con el resto de celdas se dispara y, en consecuencia, los niveles de interferencia se incrementan significativamente. Este problema pone de manifiesto la importancia de la gestión de interferencia en LTE, que en gran medida puede llevarse a cabo mediante una asignación dinámica de los recursos adecuada. No obstante, con niveles de

carga muy elevados la técnica de asignación dinámica de recursos puede resultar insuficiente para la reducción de interferencia.

Para reducir la complejidad computacional del algoritmo de asignación, la mayoría de planificadores realizan la asignación en dos fases, en las que se asignan los recursos en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En la primera de ellas, se decide el subconjunto de usuarios que debe planificarse en 1 TTI. En la segunda de ellas, se deciden los PRBs asignados a cada usuario.

Para las funciones anteriores, es preciso realizar una estimación de la calidad del canal que experimenta cada usuario. En el caso del enlace descendente (de la estación base al terminal), esta medida se realiza por el terminal y se envía al eNB periódicamente mediante el indicador *Channel Quality Indicator* (CQI). El eNB utiliza esta información para realizar la asignación de recursos y decidir el MSC a utilizar para cada usuario, aunque esta asignación final de MSC puede variar en función de otros factores [18].

#### 2.1.4. Capa de red

Entre las funciones del nivel de red destacan la (re)selección de celda, el traspaso y el control de admisión. Los requerimientos necesarios para el funcionamiento de estas funciones de gestión de recursos radio están definidos en [19].

La función de selección de celda tiene como objetivo determinar la celda en la que un terminal ocioso (es decir, sin conexión activa) debe acampar. Esta selección se realiza en función del nivel de señal que el usuario recibe desde las distintas celdas. Una vez que el terminal ya está acampado en una celda, puede cambiar de celda mediante el proceso de reelección de celda. El criterio que se utiliza para la reelección se basa en el nivel de señal recibido por el terminal desde la celda servidora. Mientras este nivel de señal se encuentra en valores aceptables, el terminal no realizará ningún cambio de celda servidora. En caso de que el nivel de señal de la celda servidora caiga por debajo de cierto umbral, el terminal comienza a realizar medidas de otras celdas. En caso de encontrar alguna celda de la que se reciba la señal con mayor nivel, se lleva a cabo el cambio de celda servidora. El nivel de señal exacto por debajo del cual el terminal comienza a realizar medidas y por encima del cual se dispara el proceso de reelección de celda depende de ciertos parámetros configurables por el operador [20].

La gestión de la movilidad cuando un terminal se encuentra en modo conectado se lleva a cabo a través del proceso de traspaso (*Handover*, HO). Mediante el HO, se pretende mantener la calidad de la llamada cuando el usuario se desplaza. En LTE, la decisión de realizar o no un cambio de celda la toma el eNB de la celda servidora. Para que un terminal pueda realizar un traspaso entre dos celdas adyacentes, es necesario que entre ellas esté definida una relación de vecindad o adyacencia. Una celda  $B$  se considera vecina de otra celda  $A$  si está definida la adyacencia desde  $A$  a  $B$ . El término adyacencia no solo hace referencia a las

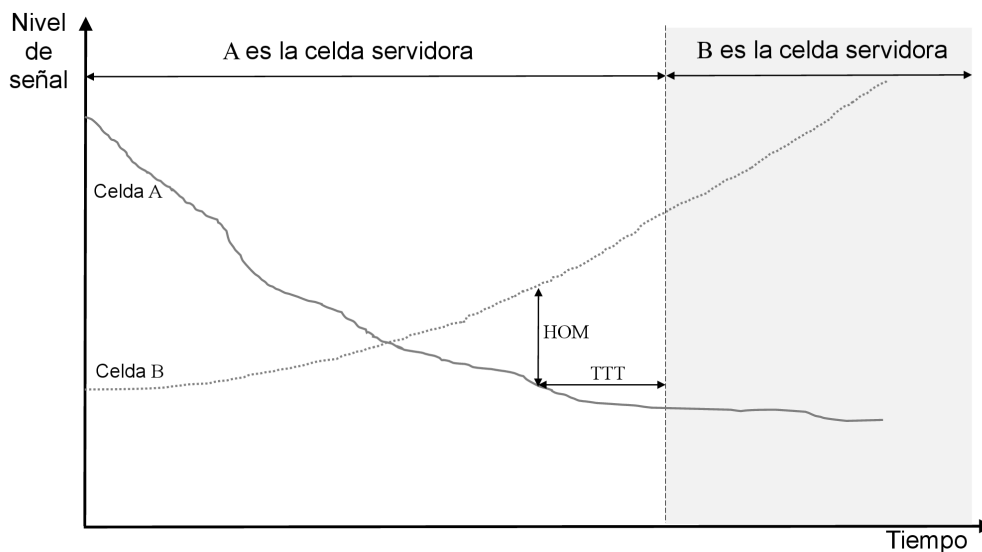


Figura 2.4: Proceso de traspaso.

dos celdas que la conforman, sino también al sentido de la misma, es decir, la adyacencia puede definirse desde *A* hacia *B* y desde *B* hacia *A*.

Existen diferentes algoritmos de traspaso en función del objetivo que se persigue con los cambios de celdas. El más habitual, conocido comúnmente como traspaso por balance de potencia (*Power BudGeT*, PBGT), busca que el terminal esté conectado a la estación base que le ofrezca el mayor nivel de señal. La Figura 2.4 muestra un ejemplo de traspaso por PBGT. En la figura se muestra la evolución del nivel de señal recibido por un usuario conforme se desplaza entre 2 celdas. Se observa que el nivel de señal recibido de la celda servidora decrece progresivamente, al tiempo que se incrementa el nivel de señal de una celda vecina. En el momento en el que el nivel de señal recibido desde la celda vecina supera un cierto margen, conocido como margen de traspaso (*HandOver Margin*, HOM), el nivel de señal recibido desde la celda servidora, se inicia un temporizador. Si el nivel de señal de la celda vecina se mantiene por encima del margen de traspaso establecido durante un periodo denominado *Time To Trigger* (TTT), se realiza finalmente el traspaso.

De la figura anterior, se deduce que modificando el margen de traspaso puede adelantarse o retrasarse el instante en el que se realiza el traspaso. El mismo efecto se consigue modificando la potencia de transmisión de la celda servidora o adyacente. Con estos cambios, es posible modificar el área de servicio de las celdas (esto es, el área geográfica donde un terminal se mantiene conectado a una celda), lo que puede aprovecharse para repartir el tráfico entre celdas vecinas. Otra función importante es el control de admisión radio (*Radio Admission Control*, RAC). El objetivo de esta función es decidir si se acepta cada nueva petición de servicio. Para ello, un algoritmo de RAC debe comprobar si, ante la llegada de una petición de un determinado servicio con unos requerimientos de calidad específicos, se pueden garantizar estos requerimientos tanto para la nueva conexión como para

las conexiones ya establecidas.

Los criterios de admisión determinan en buena medida la experiencia del usuario en la red una vez la conexión quede establecida. Así, unos criterios de admisión demasiado exigentes provocan un bloqueo de numerosas peticiones, aunque en la red las llamadas aceptadas experimentarían buenas tasas de transmisión. Unos criterios demasiado laxos provocan, en cambio, una tasa de bloqueo de conexión muy baja, pero, por el contrario, los usuarios con conexión en la red experimentan unas condiciones de transmisión adversas debido a la falta de recursos en la red.

## 2.2. Redes autoorganizadas

En los últimos años, el aumento del tamaño y la complejidad de las redes móviles han provocado que las tareas de despliegue, operación y mantenimiento de red se hayan complicado enormemente. Para hacer frente a este problema, surgen las técnicas de automatización aplicadas en las redes autoorganizadas (SON).

Las razones que, desde un punto de vista tecnológico, justifican el desarrollo de SON pueden ser:

1. la existencia de procesos realizados por el operador que se repiten en el tiempo y en el espacio, cuya automatización supondría una gestión más eficiente de las tareas de operación y despliegue, y
2. la existencia de tareas que, por realizarse demasiado frecuentemente o requerir demasiada granularidad (por ejemplo, por usuario o conexión), son demasiado complejas para ser realizadas manualmente.

Desde un punto de vista económico, los beneficios de SON pueden ser:

1. minimizar la intervención humana, reduciendo así los costes de despliegue y operación de red y liberando al personal de tareas rutinarias,
2. maximizar el rendimiento de la infraestructura de red existente, al aplicar algoritmos avanzados de gestión de red, retrasando la inversión en nuevo equipamiento, y
3. reducir los fallos de la red producidos por errores humanos.

Las capacidades de una red autoorganizada abarcan la autoconfiguración (*self-configuration*), la autooptimización (*self-optimization*) y la resolución automática de problemas o autocuración (*self-healing*). Este trabajo queda englobado dentro de la capacidad de optimización automática. No obstante, para contextualizar adecuadamente el mismo, en los siguientes apartados se describen cada una de ellas.

### 2.2.1. Autoconfiguración

De la misma forma que aumenta la complejidad de las redes móviles, la integración de un nuevo elemento en la misma es también cada vez más complicada. En los últimos años, el tamaño de las celdas se ha ido reduciendo, por lo que la integración de nuevos elementos es cada vez más frecuente, y resulta fundamental automatizar este proceso para reducir costes y errores.

La autoconfiguración hace referencia a la capacidad de la red para realizar la puesta en marcha de forma automática de un nuevo elemento en la red. Se trata, por tanto, de automatizar las tareas de despliegue de una red. La autoconfiguración permite añadir un nuevo elemento usando la aproximación “*plug&play*”, es decir, la conexión del elemento a la red y su configuración inicial se realiza de forma automática, sin intervención del operador. De esta forma, se reducen los costes de instalación al mismo tiempo que se asegura una correcta integración del elemento en la red.

A continuación se resumen algunas de los casos de uso más importantes definidos en el ámbito de la autoconfiguración para LTE [6, 7, 10]:

- **Configuración de la conexión de la celda dentro de la red.** Se trata de configurar de forma automática todos los enlaces necesarios hacia otros elementos y que, de esta forma, el nuevo elemento quede correctamente integrado dentro de la red. Dentro de este proceso estarían, entre otras, acciones como la configuración de las interfaces X2 y S1, así como la obtención de una dirección IP y la configuración del enlace IP de retorno.
- **Configuración del identificador de celda.** El identificador de celda (*Physical Cell Identity*, PCI) es un código empleado en procesos tan importantes como la sincronización o la ubicación de señales piloto. Existen solo 504 valores de PCI disponibles que deben reutilizarse a lo largo de toda la red. En la configuración de PCI deben evitarse que celdas vecinas utilicen el mismo PCI. Tomar esta decisión basándose en información obtenida un vez la celda es activada es más eficiente que hacerlo previamente y, por tanto, es una medida que debe formar parte del proceso de autoconfiguración.
- **Configuración automática de parámetros radio.** Aunque es habitual que antes de conectar una nueva celda o nodo a la red se haga un ejercicio de planificación, también es habitual que una vez conectado se descubra que los datos usados en la etapa de planificación no encajan con los reales. Una vez el elemento se conecta, éste tiene acceso a nueva información que, utilizada de forma adecuada, puede servir para realizar un ajuste fino de los parámetros radio.

Los parámetros que pueden ajustarse incluyen parámetros físicos, como la potencia de transmisión de las antenas o el ángulo de apuntamiento en antenas direccionales, o parámetros lógicos de los algoritmos de gestión de recursos, como los márgenes de traspaso.

- **Generación automática de lista de vecinas.** Tener una lista de vecinas adecuadas es imprescindible para el correcto funcionamiento de una celda. Una mala configuración de la lista de vecinas se traduce en llamadas caídas, ya que trasposos oportunos hacia celdas que no están incluidas en dicha lista no pueden llevarse a cabo. Aunque es posible construir una lista de vecinas inicial durante el proceso de planificación, la configuración de esta lista puede refinarse cuando el nuevo elemento entra en funcionamiento y los terminales móviles que se conectan a él comienzan a enviar reportes con mediciones de nivel de señal de otras celdas. Esta funcionalidad permite crear una lista de vecinas fiable en tiempo real basándose en esa nueva información recibida durante la fase de operación. De esta forma, se permite la movilidad de los usuarios hacia celdas adyacentes, manteniendo su conexión y evitando llamadas caídas.
- **Testeo automático.** Una vez realizada la configuración inicial, es importante llevar a cabo las pruebas necesarias para verificar su correcto funcionamiento y detectar posibles errores en la configuración.

Algunas de estas tareas pueden realizarse involucrando únicamente al nuevo elemento introducido, mientras que otras pueden requerir la cooperación entre distintos elementos de la red. En consecuencia, podría decirse que la autoconfiguración no es una capacidad del nuevo elemento que se introduce, sino de toda la red. No obstante, en ocasiones, la autoconfiguración debe llevarse a cabo casi exclusivamente por el nuevo elemento. Un claro ejemplo son las femtoceldas, que deben acometer esta serie de tareas de forma automática cuando se conectan por primera vez a la red.

### 2.2.2. Autooptimización

El principal propósito de la autooptimización es obtener el máximo rendimiento de la infraestructura de red disponible en cada momento. Para ello, es preciso asegurar que los elementos instalados operan de la forma más eficiente posible. Las técnicas de optimización analizan el desempeño de la red y realizan los cambios necesarios para adaptar su funcionamiento a las necesidades de los usuarios y el operador. Este proceso de optimización es importante, a pesar de que la red haya sido configurada automáticamente, ya que es necesario adaptar esta configuración a los cambios que se produzcan en la red.

Las principales razones por las que se producen estos cambios en el funcionamiento de la red son:

- a) Cambios en las condiciones de propagación de la señal. La autooptimización debe ajustar los parámetros de la red para evitar los efectos negativos que los cambios del entorno de propagación pueden tener sobre el rendimiento de la red. Los cambios en las condiciones de propagación pueden deberse a diferentes

razones, como por ejemplo la construcción o derribo de un edificio, o cambios en el medio de propagación debido a las variaciones estacionales.

- b) Cambios en la demanda de tráfico. Un ajuste adecuado de los parámetros puede ayudar a minimizar el impacto negativo que los cambios en la distribución espacial y/o temporal del tráfico puedan tener sobre el rendimiento de la red. Estos cambios pueden deberse a múltiples razones como periodos vacacionales o aparición de nuevas infraestructuras (por ejemplo, autovías, colegios o centros comerciales).
- c) Cambios en la infraestructura de la red. Aunque la autoconfiguración procura una apropiada integración de todo nuevo elemento en la red, la inclusión de un nuevo elemento afecta a los elementos circundantes. La autooptimización se encarga de adaptar la configuración de los elementos ya existentes a las nuevas condiciones de funcionamiento, consiguiéndose así un rendimiento óptimo.

A diferencia de la configuración automática, que solo es necesaria tras la instalación de un nuevo elemento en la red, la optimización automática debe realizarse de forma continua. A continuación se definen algunos de los principales casos de uso definidos para la autooptimización [6, 7, 10]

- **Optimización de la movilidad.** La optimización de la movilidad pretende garantizar el desplazamiento de los usuarios por la red sin interrupción de la conexión. Con ello, se consigue: a) minimizar el número de llamadas caídas debido a una mala configuración de los parámetros de traspaso, b) minimizar el número de traspasos innecesarios, producto de inestabilidades en el proceso de traspaso (p.ej., efecto ping-pong), reduciendo el tráfico de señalización y la probabilidad de pérdida de llamada durante el traspaso, y c) asegurar un proceso de acampada de los usuarios alineado con el proceso de traspaso. La optimización de la movilidad puede afectar a traspasos entre celdas de la misma frecuencia, celdas de distinta frecuencia o, incluso, celdas de distintas tecnologías.
- **Optimización de calidad y cobertura.** Los principales objetivos de este caso de uso son reducir la interferencia creada hacia celdas vecinas (es decir, mejorar la calidad de conexión) y cubrir posibles huecos de cobertura (es decir, mejorar la cobertura). En las redes celulares, donde existe reutilización del espectro, existe un compromiso entre el incremento de la cobertura y la reducción de la calidad de conexión producida por la interferencia. Dicho compromiso puede gestionarse ajustando parámetros de la red de acceso, como por ejemplo el ángulo de orientación de las antenas y la potencia de transmisión de la estación base y el terminal.
- **Balance de carga.** El balance de carga es el proceso por el cual dos elementos de red similares se reparten la demanda de tráfico existente. En el caso particular de las estaciones base, el balance de carga hace referencia al desplazamiento de usuarios desde celdas con problemas de congestión hacia

celdas vecinas. Con ello, se mejora la accesibilidad de la red, al mismo tiempo que se aumenta la capacidad de la misma al sacar el máximo provecho de los recursos existentes. El balance de carga puede limitarse a celdas que comparten la misma banda de frecuencia, o puede extenderse a celdas de distintas frecuencias o tecnologías. El trabajo realizado en esta tesis se engloba dentro del balance de carga entre celdas de la misma banda de frecuencia en un entorno de red heterogénea.

- **Ahorro de energía.** Con el incremento previsto del número de estaciones base, la factura eléctrica puede convertirse en una de los principales componentes del coste de operación de las redes celulares. Como consecuencia, los operadores de telefonía móvil han incluido entre sus prioridades reducir el consumo eléctrico de sus redes para reducir los costes de operación y respetar el medio ambiente. Reducir el número de portadoras activas en un determinado nodo durante las horas de poco tráfico, o apagar algunas celdas al mismo tiempo que se aumenta el área de cobertura de celdas vecinas, son algunas de las medidas adoptadas para reducir el consumo de energía.

### 2.2.3. Autocuración

El aumento del número de elementos en las redes celulares provoca que las averías sean más frecuentes. La funcionalidad de autocuración permite detectar averías en la red y enmascarar sus efectos a los usuarios, de forma que éstos perciban una degradación mínima del servicio mientras la avería se repara de forma definitiva.

La red de acceso radio es la parte de la red más vulnerable a errores. Esto se debe principalmente a que cada celda tiene su propia área de cobertura y no es sencillo solucionar una avería total o parcial de una celda haciendo uso de otros equipos. En consecuencia, cualquier degradación del servicio provocada por la avería de una celda se traduce directamente en una degradación de la calidad percibida por los usuarios que están conectados a ella. Así, una avería en la red de acceso radio afectará de forma evidente al nivel de satisfacción de los usuarios y, por consiguiente, a los ingresos del operador.

Para asegurar el correcto funcionamiento de las técnicas de autocuración, es preciso incluir una serie de elementos que permitan la detección de errores para una posterior gestión de los mismos. Algunas de las tareas que deben llevar a cabo estos elementos son la monitorización del rendimiento de la red, la realización de pruebas de validación y la recolección de datos para realizar un análisis avanzado de los mismos. A continuación se describen los dos principales casos de uso considerados en la autocuración.

- **Degradación de una celda.** La detección de la degradación de una celda y, posteriormente, la definición de las acciones a seguir para paliar sus efectos constituyen uno de los casos más habituales de autocuración. El primer paso es detectar correctamente dicha degradación, lo que puede realizarse



monitorizando indicadores de rendimiento importantes de la red, como, por ejemplo, la potencia de transmisión de la celda o la tasa de caída de llamadas. La principal dificultad en esta tarea es definir los límites aceptables para cada indicador, que, una vez superados, indiquen una degradación significativa en el funcionamiento de la celda.

Una vez detectada la degradación, se activa una alarma para comenzar las acciones pertinentes, tanto automáticas como manuales, para minimizar la degradación. Las acciones a tomar pueden ser de distintos tipos, dependiendo del tipo de degradación. En el caso más habitual, se realizan ajustes de la configuración de parámetros de la celda donde se ha detectado la degradación y de sus celdas vecinas, para resolver el problema.

- **Caída de una celda.** Una de las acciones que mayor importancia tiene para el operador es detectar y compensar la caída de una celda. Se entiende por caída de una celda la interrupción total o parcial del servicio de la misma, debido normalmente a una avería. El principal caso de interés es aquél en el que la celda no es capaz de detectar su mal funcionamiento por sí sola, siendo incapaz de informar al sistema de soporte a las operaciones. Uno de los requisitos es que el conjunto de la red debe responder rápidamente a la caída de una celda haciendo una detección inmediata, cuantificando el impacto potencial en el rendimiento de la red y realizando los ajustes necesarios en la configuración de red para compensarla. Debido a que la actuación debe ser inmediata, es necesario que esta se haga de forma automática y no requiera de intervención humana.

Si la caída de la celda es parcial, se realizan los ajustes necesarios en la propia celda caída. Si estas medidas no son suficientes, o la caída de la celda es total, los ajustes se realizarán en las celdas vecinas. La compensación de una celda caída suele realizarse aumentando el área de cobertura de sus celdas vecinas mediante la modificación del ángulo de inclinación o la potencia de transmisión.

Estas acciones pueden ponerse en marcha para mitigar los efectos de una celda caída sin necesidad de una entidad centralizada. Sin embargo, es posible que, tras el proceso de compensación, el rendimiento de la red se vea afectado negativamente. Por tanto, es importante informar del fallo al sistema de soporte a las operaciones, encargado de registrar y poner en marcha las acciones de corrección necesarias. Una vez se repara el fallo, es necesario restituir la configuración original de la red.

### 2.3. Femtoceldas

Los estudios llevados a cabo demuestran que más de dos tercios de la demanda del tráfico y más de un 90 % de los servicios de datos en comunicaciones móviles se originan en casa o en el trabajo. Sin embargo, más del 40 % de las casas y el 30 % de las oficinas ofrecen mala cobertura [1, 2, 3]. Por lo tanto, uno de los grandes retos

de los operadores móviles es proveer una buena cobertura en interiores de forma eficiente. Una de las tecnologías más prometedoras para solventar este problema son las femtoceldas.

Las femtoceldas, también conocidas como estaciones base de uso doméstico, son estaciones base de pequeño tamaño que se instalan en entornos residenciales o comerciales de manera aislada o en grupos para mejorar la cobertura móvil en el interior de los edificios. Se trata de estaciones base de baja potencia y alcance (normalmente alrededor de decenas de metros) que utilizan las bandas de frecuencia propiedad del operador, usando como red de retorno Internet o un canal radio separado.

El uso de femtoceldas para ofrecer cobertura en interiores tiene importantes ventajas con respecto a la solución más común de aumentar el número de estaciones macrocelulares [3]. Desde la perspectiva del operador, las ventajas son que: a) el coste de instalación y operación de una femtocelda es muy inferior al de una estación base convencional, b) el retorno de las femtoceldas hacia la red troncal se realiza por canales distintos al del resto de la red, descargando la red de retorno convencional, y c) las femtoceldas, al ubicarse en entornos interiores, normalmente aislados del exterior, alivian la sobrecarga del espectro radioeléctrico, permitiendo un uso más eficiente del mismo. Desde el punto de vista del usuario, la mejora de la cobertura y calidad de conexión en interiores se traduce en una mejor calidad de servicio. Al mismo tiempo, la menor distancia entre la estación base y el terminal se traduce en una potencia de transmisión más baja, lo que incrementa la duración de la batería del terminal.

No obstante, el despliegue masivo de femtoceldas no está exento de dificultades, entre las que destaca la gestión de red. Las femtoceldas forman parte de la red de acceso radio, y tienen por tanto que funcionar de forma coordinada con el resto de equipos en la red. Esta coordinación no es sencilla, ya que, al contrario de lo que ocurre con las estaciones base convencionales, las femtoceldas no siguen un proceso exhaustivo de planificación previo a su instalación. Esta ausencia de planificación se debe al elevado número de femtoceldas y la falta de control de su ubicación, que queda en manos del usuario final. Es en estos entornos donde el uso de técnicas SON se hace imprescindible.

En los siguientes apartados se describen los escenarios de uso, la arquitectura de red y algunas de las características principales de las femtoceldas.

### 2.3.1. Escenarios de uso

El despliegue de una red de femtoceldas puede responder a diferentes necesidades, que pueden clasificarse en los siguientes casos:

1. Mejora de la cobertura en un espacio público, habitualmente en interiores, donde la señal procedente de las macroceldas no es suficiente para ofrecer

un servicio adecuado. Ejemplos de este escenario son los aparcamientos subterráneos, centros comerciales, estaciones de metro o zonas rurales aisladas.

2. Mejora del servicio a una gran cantidad de usuarios ubicados en un espacio público de dimensiones reducidas. La instalación de femtoceldas dentro del área de servicio de una macrocelda puede servir para reducir el tráfico localizado en algún área dentro de la misma. De esta manera, las femtoceldas son una solución sencilla y económica para el alivio de problemas de congestión en las macroceldas. Ejemplos de este escenario son los estadios deportivos, grandes edificios o centros universitarios.
3. Mejora del servicio ofrecido a un subconjunto de usuarios identificado previamente instalando una femtocelda en un espacio privado interior. En este caso, la femtocelda suele tener un modo de acceso cerrado o híbrido, donde el usuario propietario accede a los recursos de la femtocelda sin competir por ellos con el resto de usuarios de las macroceldas. Algunos ejemplos de este escenario son viviendas residenciales, oficinas o restaurantes.

El despliegue de una red de femtoceldas no siempre se debe a una sola de estas razones, respondiendo en la mayoría de las ocasiones a varias de ellas al mismo tiempo.

### 2.3.2. Arquitectura de red

La Figura 2.5 representa la estructura de una red de femtoceldas en E-UTRAN [21]. En ella, se observa que las femtoceldas (denominadas *Home eNodeB*, HeNB) se tratan de forma similar a un eNB, pudiendo conectarse a la red troncal directamente o a través del elemento conocido como *Home eNB Gateway* (HeNB GW). Dicho elemento asegura la escalabilidad del sistema, permitiendo que la interfaz S1 entre el HeNB y el EPC pueda soportar un gran número de HeNB. Al mismo tiempo, el HeNB GW posibilita la realización traspasos entre HeNB conectados al mismo HeNB GW sin necesidad del MME.

La Figura 2.6 muestra la estructura lógica de una red de femtoceldas. Se observa que el HeNB GW, en caso de existir, sirve de concentrador para el plano de control, es decir para la interfaz entre el HeNB y el MME (S1-MME). En el plano de usuario, la conexión entre el HeNB GW y el S-GW se lleva a cabo a través de la interfaz S1-U que puede ser entre el HeNB y el HeNB GW, si este último existe, o terminar directamente en el S-GW.

Un HeNB debe soportar, salvo alguna excepción, todas las funciones que soporta un eNB. En consecuencia, todos los procedimientos que se desarrollan entre el eNB y el EPC son también aplicables entre el HeNB y el EPC. Esto es extensible a los traspasos entre parejas de nodos, ya sean HeNB-HeNB, HeNB-eNB o eNB-HeNB, que se harán a través de la interfaz X2, como el caso eNB-eNB.

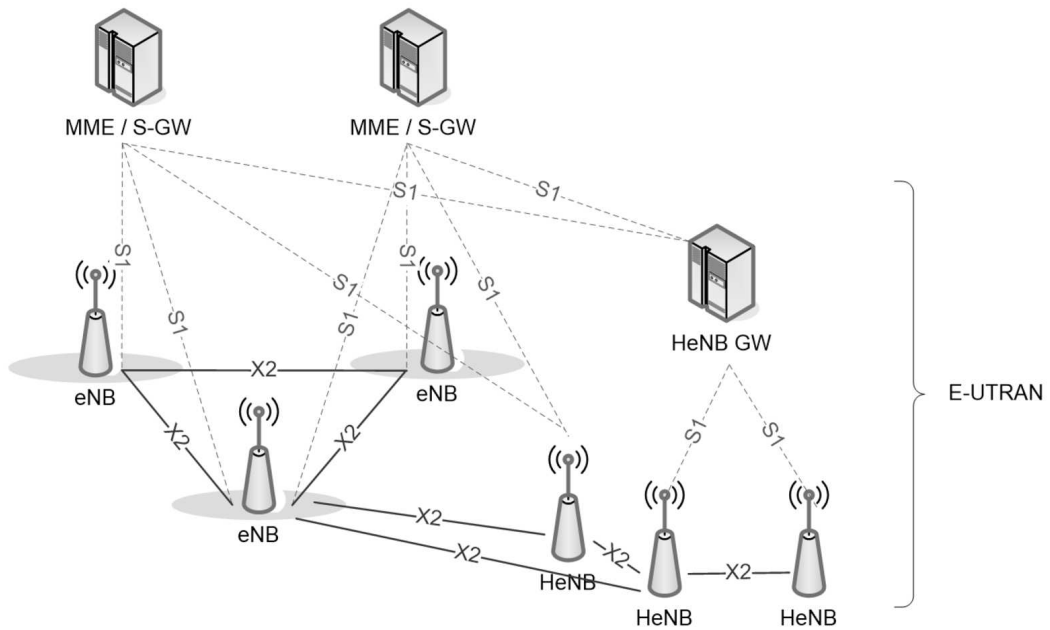


Figura 2.5: Arquitectura general de E-UTRAN para HeNB [21].

### 2.3.3. Modos de acceso

Las femtoceldas pueden disponer de una lista de suscripción de usuarios (*Closed Subscriber Group, CSG*), que pueden utilizarse para limitar el acceso a las mismas. Existen tres métodos de control de acceso, que determinan cuándo se permite o se bloquea a un determinado usuario:

1. **Acceso abierto.** El acceso abierto se corresponde con el funcionamiento típico de una macrocelda, donde cualquier usuario puede conectarse a la femtocelda. Este tipo de acceso es apropiado para centros comerciales, aeropuertos, restaurantes y lugares públicos similares, donde se pretende dar cobertura al público en general en un entorno de interiores.
2. **Acceso cerrado.** En el método de acceso cerrado, los servicios que ofrece la femtocelda solo están disponibles para un conjunto limitado de usuarios (es decir, usuarios pertenecientes al CSG). Este conjunto de usuarios se define por el propietario de la femtocelda que, normalmente, es de uso privado. Este tipo de acceso está concebido principalmente para uso doméstico.
3. **Acceso híbrido.** El método de acceso híbrido representa un caso intermedio entre los dos anteriores. Con este tipo de acceso, se pretende mejorar las prestaciones de la red que ofrecen tanto el acceso abierto como el acceso cerrado. En el modo de acceso híbrido, se define también un grupo restringido de usuarios (CSG), que acceden de forma prioritaria a los recursos de la femtocelda. Sin embargo, usuarios que no pertenecen al CSG tiene permitido

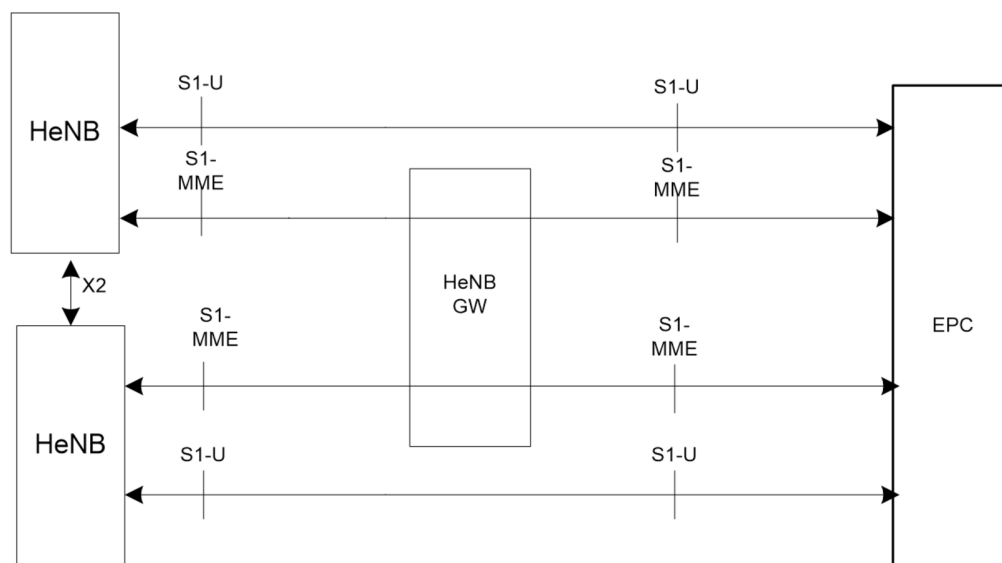


Figura 2.6: Arquitectura lógica de E-UTRAN para HeNB [21].

el acceso solo a una parte reducida de los recursos. Con ello, se pretende paliar los problemas de interferencia generados por el esquema de acceso cerrado.

En la Figura 2.7 se muestra un ejemplo de funcionamiento de los tres tipos de control de acceso. Como puede verse, los usuarios que pertenecen al CSG pueden acceder a los recursos de todas las femtoceldas. Por el contrario, los usuarios que no pertenecen al CSG tienen acceso total a los recursos de las femtoceldas de acceso abierto, limitado cuando su acceso es híbrido y sin acceso a los recursos de la femtocelda de acceso cerrado.

Cuando el modo de acceso es abierto, los usuarios de las macroceldas que se encuentran en interiores pueden conectarse a las femtoceldas, liberando espacio de la macrocelda y mejorando la calidad de conexión. Por lo tanto, desde el punto de vista del operador móvil, el modo de acceso abierto es el óptimo, ya que maximiza la capacidad de la red y mejora la calidad de las conexiones de los usuarios de las macroceldas. No obstante, cuando usuarios de la macrocelda se conectan a una femtocelda, hacen uso de los recursos de ésta, por lo que los usuarios propietarios de la misma pueden percibir un deterioro de su calidad de experiencia. En consecuencia, desde el punto de vista del usuario propietario de la femtocelda, el modo de acceso cerrado es el que optimiza su calidad de experiencia. El modo de acceso híbrido permite un compromiso entre ambas partes, sin deteriorar en exceso el servicio ofrecido al usuario propietario de la femtocelda.

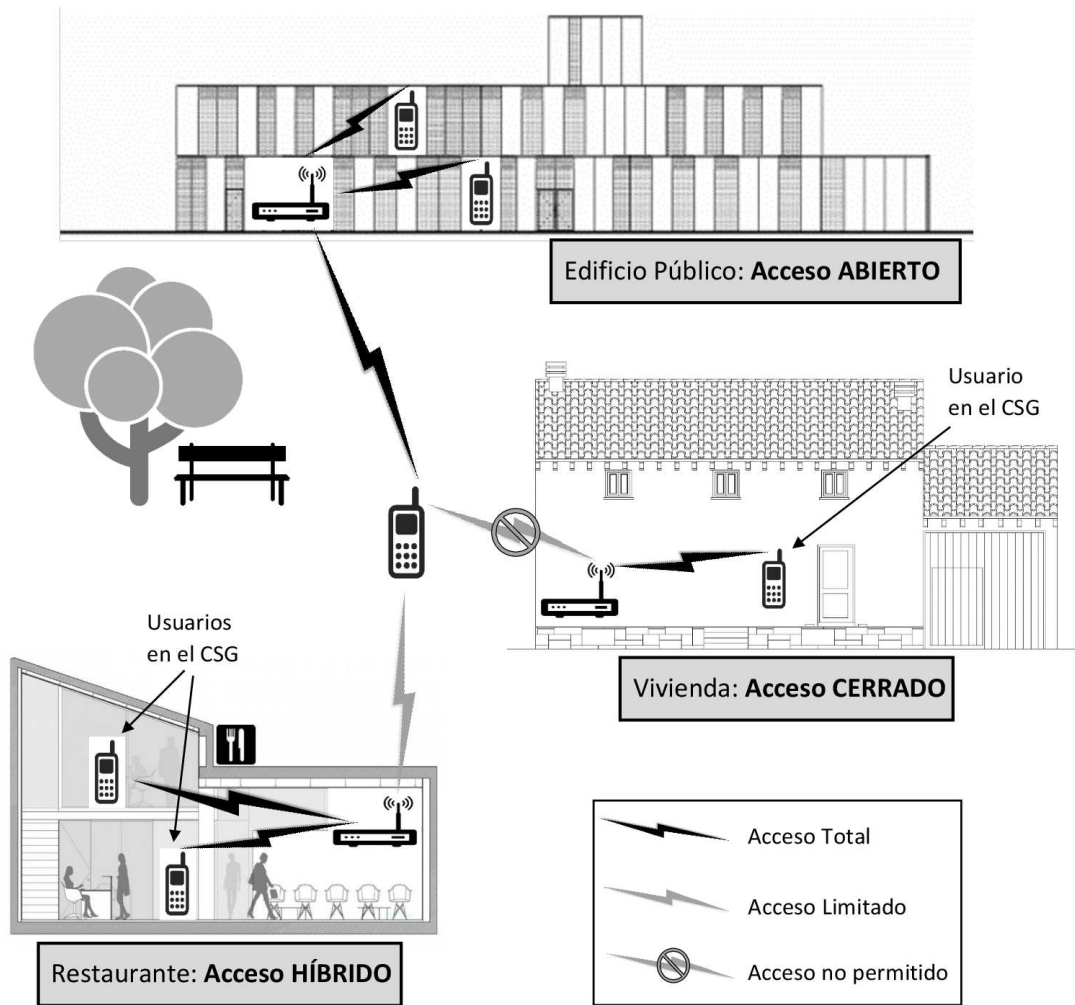


Figura 2.7: Esquemas de acceso en una red de femtoceldas.

### 2.3.4. Movilidad de usuario

Los usuarios que se conectan a una femtocelda deben hacerlo sin interrumpir su conexión, de lo que se encargan los mecanismos de movilidad. Estos procesos deben garantizar que el traspaso en femtoceldas se realiza de la misma forma que en macroceldas, a pesar de que el canal de retorno de las femtoceldas es distinto.

Según el origen y el destino del usuario, existen tres tipos de traspaso en femtoceldas, que son:

1. *Traspaso desde una macrocelda hacia una femtocelda.* Este tipo de traspaso ocurre cuando el usuario pasa de exterior a interior, situación que ocurre con asiduidad. La principal dificultad radica en que la macrocelda y la femtocelda usan canales de retorno distintos. Debido a esto, el proceso de traspaso en este caso se realiza siempre a través de la red troncal. La femtocelda debe

estar identificada con un identificador único, como cualquier macrocelda, y debe estar incluida en la lista de vecinas de la macrocelda. Además, se debe comprobar si la femtocelda es de acceso abierto o híbrido, en cuyo caso el traspaso podrá realizarse, o de acceso cerrado, en cuyo caso el traspaso solo podrá llevarse a cabo si el usuario pertenece al CSG de la femtocelda destino.

2. *Traspaso desde una femtocelda a otra femtocelda.* Este tipo de traspaso se suele dar en redes de femtoceldas, siendo el caso más sencillo. Si ambas femtoceldas se conectan al mismo HeNB GW, el traspaso se realiza a través del mismo sin necesidad de llegar a la red troncal. Si este no es el caso, el traspaso debe realizarse, al igual que en el caso anterior, a través de la red troncal. Además, si ambas femtoceldas son de distintos propietarios y su acceso no es abierto, es necesario comprobar si el usuario pertenece al CSG de la femtocelda destino.
3. *Traspaso desde una femtocelda hacia una macrocelda.* Este tipo de traspaso ocurre cuando el usuario pasa de interior a exterior. A diferencia del traspaso desde una macrocelda a una femtocelda, no es necesario comprobar el modo de acceso, ya que el traspaso es hacia la macrocelda, donde el acceso es abierto a todos los usuarios. Al igual que en el primer tipo de traspaso, el proceso de señalización debe realizarse a través de la red troncal.

### 2.3.5. SON en femtoceldas

Si bien las funcionalidades de SON se consideran como una capacidad de red importante en redes de macroceldas, en el caso de femtoceldas puede considerarse como imprescindible. Uno de los principales requisitos del despliegue de femtoceldas es que su instalación, configuración y ajuste debe realizarse sin la intervención del usuario propietario. Así, un usuario sin conocimientos técnicos debe poder instalar una femtocelda. Una vez instalada, la femtocelda debe funcionar correctamente sin intervención del usuario, incluso si se producen cambios en el entorno.

Por tanto, la instalación de femtoceldas debe seguir un modelo “*plug&play*”, requiriendo del usuario únicamente la configuración de la conexión de la femtocelda a la red de retorno. Para ello, la femtocelda debe incorporar algoritmos SON, que permitan que su funcionamiento sea el esperado en un entorno complejo y cambiante, como es el entorno de interiores. A continuación se justifica por qué es importante incorporar cada una de las capacidades SON en las redes de femtoceldas.

- **Autoconfiguración.** Tras conectar la femtocelda a la red de retorno, ésta debe establecer la configuración inicial de sus parámetros de funcionamiento para ser operativa. Entre estas tareas de configuración inicial, se incluyen la configuración de la interfaz S1 hacia el HeNB GW o hacia la red troncal, según corresponda, la creación de su lista de celdas vecinas (que incluye tanto macroceldas como femtoceldas) o el ajuste de su potencia de transmisión. Todos estos ajustes iniciales deben realizarse teniendo en cuenta el

entorno que rodea a la femtocelda, que se caracteriza a través de las propias mediciones recopiladas por la femtocelda.

- **Autooptimización.** Una vez que la femtocelda está operativa, es necesario detectar los cambios en el entorno que puedan degradar el rendimiento de la red, para después reajustar sus parámetros y compensar esta degradación. En las redes de macroceldas, las labores de optimización pueden ser automáticas o realizarse manualmente por el operador. Por el contrario, en las redes de femtoceldas, las labores de optimización deben ser completamente automáticas y transparentes al usuario propietario. En consecuencia, las femtoceldas deben incorporar algoritmos capaces de ajustar la configuración de la misma a los cambios en el entorno. En la práctica, los casos de uso de autooptimización en femtoceldas son los mismos que en macroceldas, pero con la dificultad añadida del entorno de interior.
- **Autocuración.** Una femtocelda debe ser capaz de reaccionar ante cualquier problema en su funcionamiento. Al no existir la figura de un operario para resolver problemas inesperados, los algoritmos de autocuración deben ser más robustos, ya que si ella misma no es capaz de recuperarse, el problema persistirá hasta que la femtocelda sea sustituida o reparada.

## 2.4. Conclusiones

El estándar LTE se presenta como una mejora sustancial en las redes de comunicaciones móviles frente a los estándares anteriores. Estas mejoras vienen determinadas tanto por su estructura de red, que, basada íntegramente en IP, incluye nuevas entidades e interfaces, como en las prestaciones ofrecidas al usuario. No obstante, la gran complejidad de los sistemas que integran la red LTE, la escasa cobertura y capacidad que se alcanza en zonas de interiores, o la interferencia entre celdas debido a la reutilización total de frecuencias, son nuevos desafíos que emergen con esta nueva tecnología. Para este desafío, la funcionalidad SON en una red busca automatizar todos los procesos que, por su complejidad, deben realizarse de forma automática. Asimismo, las femtoceldas o estaciones base de uso doméstico son la solución tecnológica aportada para reducir los problemas de cobertura y capacidad en interiores. Las femtoceldas, por su naturaleza menos jerárquica, necesitan en mayor medida las técnicas SON, especialmente para su autoconfiguración y autooptimización. Más aún, la especificidad en los escenarios de interiores corporativos, donde la demanda de tráfico es bastante irregular en espacio y tiempo, demandan nuevos algoritmos y técnicas que solucionen los problemas de congestión e interferencia.

En los próximos capítulos se estudian diversas soluciones para la congestión en redes de femtoceldas corporativas LTE. Estas soluciones incluyen métodos automáticos de optimización y planificación de red.





## Capítulo 3

# Técnicas de reparto de tráfico

En este capítulo se estudia el problema del reparto de tráfico entre femtoceldas en un escenario de oficinas. Para ello, el capítulo se divide en cinco secciones. La Sección 3.1 revisa el estado de la investigación y la tecnología de la gestión de tráfico en redes celulares, prestando especial atención al problema del balance de carga en interiores. A continuación, la Sección 3.2 formula el problema del reparto de tráfico mediante el cambio de parámetros de traspaso. Dicha formulación permite identificar las principales limitaciones del reparto de tráfico en LTE, confirmadas con una prueba de campo de un algoritmo clásico de balance de carga en una red comercial. Tras presentar el problema, en la Sección 3.3 se describen los algoritmos de reparto de tráfico para redes de femtoceldas corporativas, que son la principal contribución de esta tesis. En la Sección 3.4 se presentan los resultados obtenidos con los algoritmos propuestos en un simulador de nivel de sistema y en la Sección 3.5 se presentan las conclusiones de este capítulo.

### 3.1. Estado de la investigación y la tecnología

El reparto de tráfico busca equilibrar la cantidad de tráfico cursado entre celdas vecinas con el objetivo de disminuir el número total de llamadas bloqueadas en el sistema y, de esta manera, aumentar el tráfico total cursado en la red. Para conseguir este efecto, es posible modificar el área de servicio de cada celda, para así reducir o incrementar la cantidad de tráfico cursado por cada una de ellas, aprovechando el solapamiento existente entre celdas vecinas. Al reducir el área de servicio de una celda, se disminuye la cantidad de tráfico cursada por ésta, tráfico que absorben sus celdas vecinas.

En la literatura se han propuesto diferentes maneras de modificar el área de servicio de una celda. Un primer grupo de técnicas ajusta parámetros físicos de la estación base, como la potencia de transmisión de pilotos [22] o el diagrama de radiación de la antena [23]. En la práctica, estas técnicas rara vez se utilizan, porque pueden crear huecos de cobertura, a menos que los cambios en las celdas adyacentes estén sincronizados con los de la servidora. Como alternativa, un segundo grupo de técnicas modifica los parámetros de los procesos *Radio Resource*

*Management* (RRM), como la reelección de celda (*Cell Reselection*, CR) [24] y el traspaso o HO [25]. Esta última suele ser la opción preferida, ya que la modificación de los parámetros de CR solo tiene efecto durante el establecimiento de la conexión, no teniendo influencia durante el resto de la conexión. Por este motivo, la mayoría de los algoritmos de reparto de tráfico para redes celulares descritos en la bibliografía se basan en los márgenes de traspaso [11, 12, 25, 26, 27, 28, 29].

Para encontrar el valor óptimo de los márgenes de traspaso, el problema de ajuste de los márgenes puede formularse como un problema de optimización clásico [30, 31]. Sin embargo, los operadores suelen resolver este problema por medio de reglas heurísticas, ya que los datos y medidas necesarios para construir el modelo analítico raramente están disponibles. Un ejemplo del uso de reglas heurísticas es la ecualización del tráfico de celda a lo largo de la red por medio de un algoritmo de reparto de tráfico. Dependiendo de la velocidad del proceso de reasignación de tráfico, el indicador de rendimiento que se intenta equilibrar puede ser la carga media de la celda (como, p. ej., [11, 12, 26, 27, 28]) o la tasa de bloqueo (p.ej., [25, 29]). Como se muestra en [32], esta última opción presenta un mejor rendimiento cuando los problemas de congestión son persistentes, debido a su mayor estabilidad y, sobre todo, a que no necesita ninguna inversión en equipamiento, ya que puede realizarse de forma centralizada en el sistema de soporte a las operaciones como parte de las tareas de optimización de red.

En paralelo, las femtoceldas han atraído la atención de la comunidad investigadora, algo que se hace evidente por el elevado número de proyectos de investigación en este ámbito (p.ej., HOMESNET [33], BeFEMTO [34], FREEDOM [35]). Las primeras publicaciones se centraban en escenarios residenciales con femtoceldas aisladas. Para estos escenarios, Claussen et al. proponen en [36] un algoritmo de autoajuste para configurar la potencia de transmisión del enlace ascendente y descendente en femtoceldas UMTS. De esta manera, se pretende mitigar la interferencia generada por las macroceldas en el área de servicio de la femtocelda y asegurar un radio de celda constante para la femtocelda, independientemente de la posición de ésta dentro del área de servicio de la macrocelda. En [37], los autores presentan un algoritmo de autoajuste para la potencia piloto en una femtocelda UMTS con el objetivo de mejorar la cobertura y minimizar el número total de intentos de traspaso. El mismo autor presenta en [38] un algoritmo de autoajuste para seleccionar el diagrama de radiación de la antena con la que se radia la potencia de las señales piloto. En [39], se presenta un algoritmo adaptativo para seleccionar la histéresis del margen de traspaso basándose en la posición del usuario. Estudios más recientes consideran los escenarios de oficinas, donde se despliegan redes de femtoceldas corporativas [40]. En estos escenarios, casi todos los esfuerzos se han centrado en el diseño de algoritmos RRM avanzados que realicen la gestión de la interferencia entre celdas vecinas en esquemas de transmisión OFDMA [41]. En esta línea, López et al. [42] proponen un modelo de programación lineal entera para asignar esquema de modulación y codificación, portadora radio y potencia de transmisión de forma dinámica, al mismo tiempo que se minimiza la potencia total transmitida y se atiende la demanda de tráfico de los usuarios.

De forma similar, diversas propuestas de esquemas de admisión distribuida y

planificación se inspiran en principios de SON tomados de redes cognitivas [43], algoritmos de aprendizaje autónomo [44, 45] y teoría de juegos [46]. Más relacionado con el estudio presentado aquí, sobre autooptimización, [47] propone un algoritmo distribuido para ajustar la potencia piloto en femtoceldas UMTS y equilibrar la carga de las celdas, minimizando la potencia piloto transmitida en un escenario de oficinas. En [48], el problema de planificación de frecuencia y potencia en femtoceldas *Wireless Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) de un escenario de oficinas se formula como un modelo de programación entera, cuyo objetivo puede ser minimizar la suma de la potencia de transmisión, dada una calidad de conexión mínima a cumplir, o maximizar la capacidad teórica de red, estimada a partir de la fórmula de Shannon. Sin embargo, no se ha encontrado en la literatura un trabajo que estudie el reparto de tráfico en redes de femtoceldas corporativas LTE en escenarios de varias alturas, adaptando técnicas clásicas basadas en modificación de márgenes de traspaso y/o potencia de transmisión.

## 3.2. Formulación del problema

En esta sección se estudia el problema de la congestión en la red de acceso radio y su resolución mediante técnicas de reparto de tráfico. El estudio se centra en los métodos de reparto de tráfico basados en el traspaso entre celdas. Para ello, se describen los principales parámetros de algoritmo de traspaso implementados por la mayoría de fabricantes en LTE. Posteriormente, se realiza un análisis teórico preliminar de las limitaciones del reparto de tráfico en LTE. Las conclusiones de dicho análisis se confirman después presentando los resultados de una prueba de campo de un algoritmo clásico de reparto de tráfico en una red comercial.

### 3.2.1. Congestión en la red de acceso

Uno de los principales retos a los que se enfrentan los operadores móviles cuando se realiza la planificación de la red es conocer la distribución de los usuarios. Para realizar un correcto dimensionado de la red, es preciso saber con exactitud cómo se distribuirán los usuarios y, por tanto, qué demanda de tráfico deberá cursar cada celda. De esta manera, se asegura que la distribución espacial de los recursos se ajusta a la distribución espacial de la demanda. Con el paso del tiempo, los cambios en las tendencias de los usuarios provocan que ese ajuste entre recursos y demanda se pierda. Estos cambios pueden ser permanentes (p.ej., la apertura de un nuevo centro comercial o la construcción de una nueva autovía), periódicos (p.ej., diferente comportamiento de los usuarios según la hora del día, el día de la semana o la estación del año) o eventuales (p.ej., la organización de un concierto o una simple concentración).

A largo plazo, la mejor solución para solventar problemas de congestión localizada y persistente es la replanificación de los recursos, por medio de la inclusión de nuevas portadoras, estaciones base o emplazamientos. Sin embargo, esta solución

implica una inversión importante por parte del operador, por lo que suele posponerse todo lo posible. Éste suele ser el caso de situaciones de congestión periódica o eventual, o congestión en redes maduras, donde la inversión en nuevo equipamiento no queda justificada. Algunos fabricantes ofrecen funcionalidades avanzadas de red para aliviar el problema de la congestión de forma dinámica (p.ej., reintento directo [49] o codificación a tasa reducida [50]). Lamentablemente, estas funcionalidades rara vez se encuentran disponibles por su elevado coste. Es en estas situaciones donde las técnicas de reparto de tráfico se convierten en la solución preferida del operador.

Existen diversas razones para que los fenómenos de congestión aparezcan con mayor asiduidad en celdas desplegadas en entornos de oficinas. Por un lado, la planificación de recursos de redes de interior es más complicada que en redes macrocelulares. Numerosos trabajos han estudiado las variaciones de la distribución de la demanda a nivel macroscópico, tanto en el dominio del espacio [51] como en el tiempo [52]. Los modelos de tráfico propuestos en esas referencias se utilizan con éxito en la planificación de redes macrocelulares. Sin embargo, estos modelos dejan de ser válidos en interiores, lo que complica el proceso de planificación en estos entornos. Por otro lado, las fluctuaciones de la demanda son mayores en interiores, como resultado del menor número de usuarios por celda. En este tipo de escenarios se producen concentraciones de usuarios periódicas (p.ej., inicio y fin de jornada laboral), eventuales (p.ej., sala de reuniones o cafetería) o permanentes (p.ej., diferencia de ocupación entre oficinas), que no se perciben a escala macroscópica. Estas variaciones se ven amplificadas por la diversidad del entorno de propagación radio en interiores. Todo ello justifica que las técnicas de reparto de tráfico sean más necesarios en entornos de oficinas.

### 3.2.1.1. Mecanismos de reparto de tráfico

Una de las opciones más usadas para el reparto de tráfico a través de la modificación del área de servicio de una celda consiste en ajustar sus márgenes de traspaso. El margen de traspaso de la celda  $i$  a la celda  $j$ ,  $HOM(i, j)$ , es un parámetro que define la diferencia (en dBs) con la que el nivel de señal de la celda vecina debe exceder el nivel de señal de la celda servidora para realizar un traspaso por balance de potencia (PBGT) desde la celda  $i$  a la celda  $j$  [53]. Los niveles de señal referidos corresponden a los de las señales piloto (*Reference Signal Received Power*, RSRP). De esta forma, un traspaso por PBGT se lleva a cabo cuando

$$RSRP(j) - RSRP(i) \geq HOM(i, j) , \quad (3.1)$$

donde  $RSRP(j)$  y  $RSRP(i)$  son la potencia media de señal de referencia recibida (en dBm/RE) de la celda servidora y la celda vecina, respectivamente. Como se observa en (3.1), los márgenes están definidos a nivel de adyacencia. Por tanto, si se ajusta este parámetro en una sola adyacencia, los efectos solo aparecerán en dicha adyacencia. De esta manera, es posible modificar no solo el tamaño del área de servicio, sino también su forma.

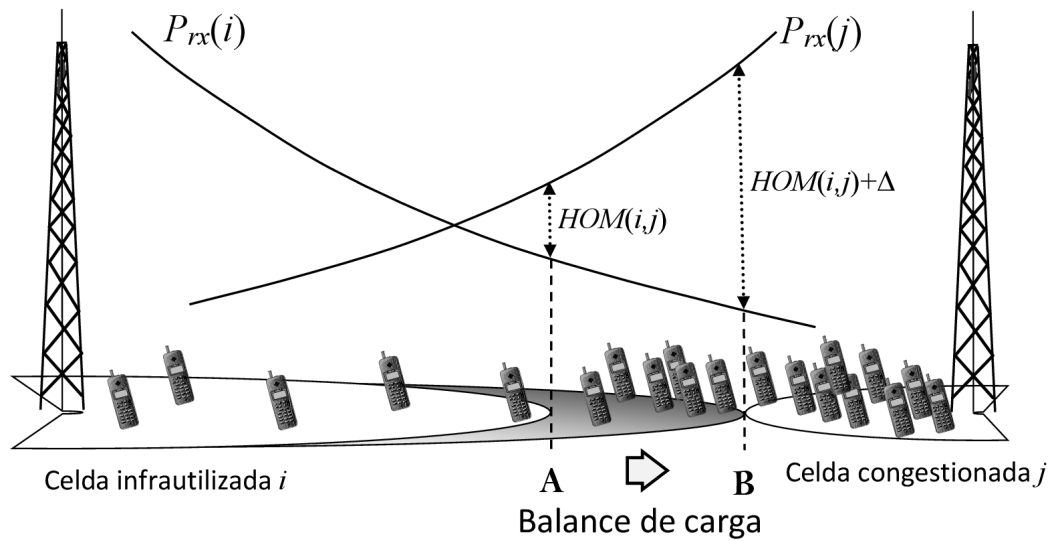


Figura 3.1: Reparto de tráfico cambiando el margen de traspaso.

La Figura 3.1 muestra cómo cambiando los márgenes de traspaso se modifica el área de servicio de una pareja de celdas colindantes. En la figura, se representa el perfil de potencia recibida por los usuarios que se desplazan entre dos celdas vecinas. Se aprecia cómo aumentando  $HOM(i,j)$  por una cantidad  $\Delta$ , se dificulta la realización del traspaso de los usuarios que se desplazan de  $i$  a  $j$ . Con ello, se retrasa el instante del traspaso (de  $A$  a  $B$ ), de forma que la frontera entre ambas celdas se aleja de  $i$ . Como consecuencia, se mueve tráfico desde  $j$  hacia  $i$ . De la misma forma, disminuyendo  $HOM(i,j)$ , los traspasos se realizan más cerca de  $i$  y más lejos de  $j$ , por lo que la frontera entre ambas se acerca a  $i$  y, en consecuencia, se envía tráfico desde  $i$  hacia  $j$ .

Este traspaso de usuarios se puede utilizar para equilibrar el tráfico entre celdas vecinas. En el ejemplo de la figura, se incrementa el margen de traspaso desde la celda infrautilizada a la celda congestionada, para que ésta última se desprenda de parte de su área de servicio (zona sombreada), que pasa a formar parte de la celda infrautilizada  $i$ . De esta manera, se alivia el problema de congestión en  $j$ . Para evitar inestabilidades en el proceso de traspaso, se mantiene una región de histéresis sincronizando los cambios en los dos sentidos de la adyacencia. Así, si el margen de la celda  $i$  a la celda  $j$  se incrementa en  $+XdB$ , el margen de la celda  $j$  a la celda  $i$  se reduce en  $-XdB$ , de manera que la suma de los márgenes en ambos sentidos de la adyacencia se mantenga.

Como alternativa, es posible cambiar el área de servicio de una celda ajustando su potencia de transmisión,  $P_{TX}(i)$ . El nivel de potencia recibida por un usuario desde una celda  $i$ ,  $P_{rx}(i)$ , es directamente proporcional a la potencia de transmisión de su estación base. Por ello, cambios en la potencia de transmisión de una celda tienen una influencia directa sobre su área de servicio. Al contrario que los márgenes de traspaso, la potencia de transmisión se define a nivel de celda,

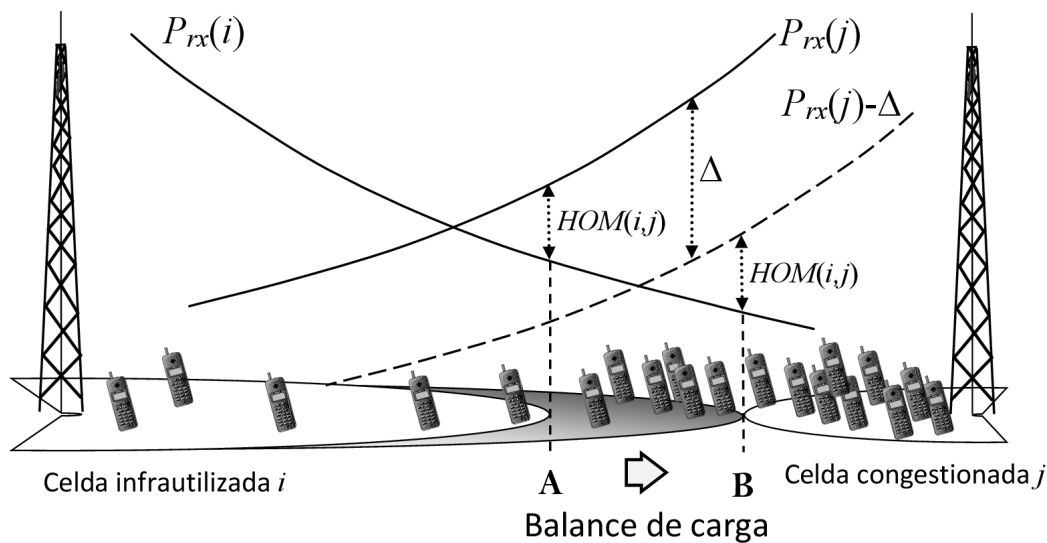


Figura 3.2: Reparto de tráfico cambiando la potencia de transmisión de la estación base.

por lo que todas las adyacencias son afectadas por igual cuando se hacen ajustes en este parámetro.

La Figura 3.2 describe el proceso de reparto de tráfico cambiando la potencia de transmisión. Disminuyendo  $P_{TX}(i)$ , los traspasos se realizarán más cerca de  $i$ , por lo que el borde del área de servicio de  $i$  se acercará y, en consecuencia, se enviará tráfico hacia sus celdas vecinas. De la misma forma, aumentando  $P_{TX}(i)$ , los traspasos se realizarán más lejos de  $i$ , por lo que el borde del área de servicio de  $i$  se alejará y, en consecuencia, se recibirá tráfico desde sus celdas vecinas. Con este mecanismo, se puede enviar o recibir tráfico desde una celda. En el ejemplo de la figura, la celda congestionada  $j$  reduce su  $P_{TX}(j)$  en  $\Delta$  dB para así desprenderse de parte de su área de cobertura (zona sombreada), que pasa a formar parte de la celda descargada  $i$ . De esta forma, se disminuye su congestión.

Conviene matizar que, mientras que los cambios de márgenes de traspaso afectan solo al área de servicio de las celdas, los cambios de potencia de transmisión afectan tanto al área de servicio como al área de cobertura. Por ello, estos últimos cambios deben realizarse con precaución para no provocar huecos de cobertura durante el proceso de reparto de tráfico. En teoría, estos problemas podrían evitarse si los cambios se realizan de forma sincronizada entre celdas vecinas, de manera que cuando la celda congestionada reduzca su potencia, las celdas vecinas incrementen su potencia [22]. En la práctica, la mayoría de las celdas trabajan con su máxima potencia, por lo que no siempre es posible dicha sincronización.

Los algoritmos de reparto de tráfico en interiores de esta tesis modifican el margen de traspaso entre femtoceldas a nivel de adyacencia,  $HOM(i, j)$ , y la potencia de transmisión de las femtoceldas a nivel de celda,  $P_{TX}(i)$ . Por simplicidad, se asume que la potencia de transmisión de los canales de control es la misma que la de los canales de datos.

En el diseño de los algoritmos, se debe tener en cuenta que el cambio de las áreas de servicio de las celdas afecta a la calidad de conexión en la red. Como resultado del reparto de tráfico, hay usuarios que se conectan a una celda que no ofrece las mínimas pérdidas de propagación. Esta pérdida de eficiencia en la transmisión radio puede degradar en ocasiones la calidad de conexión. Aunque en LTE la modulación y codificación adaptativa pueden reducir esta degradación, la capacidad de adaptación del canal es limitada. Por tanto, el reparto de tráfico debe llevarse a cabo cuidadosamente para mantener los niveles de calidad dentro de unos límites razonables. Esta restricción es importante en escenarios interiores, donde pueden aparecer huecos de cobertura y desvanecimientos de señal debido a la atenuación de los paramentos y la propagación multicamino. Por esta razón, los operadores suelen mantener la potencia de las femtoceldas en sus valores por defecto (máxima potencia) en ausencia de un método preciso para realizar los cálculos de propagación en interiores. De esta manera, se desaprovecha gran parte del potencial de este parámetro.

### 3.2.2. Limitaciones del reparto de tráfico en LTE

Para hacer un uso eficiente del espectro radioeléctrico, en las redes LTE se aplica una reutilización total del espectro de frecuencias, de forma que cada celda emplea todo el ancho de banda disponible en el sistema. Esta reutilización de frecuencias tan ajustada causa problemas de interferencia en las zonas de solapamiento entre celdas adyacentes, especialmente en áreas con una alta demanda de tráfico, que es donde se aplican las técnicas de reparto de tráfico. En GSM, estos problemas pueden evitarse mediante una planificación de frecuencias que permita aumentar la distancia entre celdas interferentes [32]. Al mismo tiempo, las técnicas de salto de frecuencia (*frequency hopping*) permiten aprovechar la diversidad de usuario para que las colisiones en la interfaz radio sean aleatorias y, con ello, mitigar el efecto de la interferencia cocanal [54]. En UMTS, el traspaso suave (*soft-handover*) [55] solventa los problemas de interferencia en el borde de celda causados por la reutilización completa del espectro. Sin embargo, estas técnicas no suelen usarse en LTE. Aunque el proceso de planificación de recursos puede paliar este problema, cuando el nivel de carga del sistema es muy elevado no es posible evitar la colisión con celdas interferentes cercanas.

Los problemas de interferencia se agravan cuando las técnicas de reparto cambian los márgenes de traspaso. El escenario de la Figura 3.1 muestra el caso en que el  $HOM(i, j)$  se incrementa en  $\Delta$  dB para enviar tráfico desde una celda congestionada  $j$  hacia una celda descargada  $i$ . Antes del reparto de tráfico, el valor de  $HOM(i, j)$  configurado por defecto para todas las adyacencias de la red suele ser positivo (en LTE, normalmente 3-4 dB). En la figura, se observa que, para un usuario en el borde de la celda  $i$  (punto A en la figura), el nivel de señal de piloto recibido desde la celda  $j$ ,  $P_{rx}(j)$ , es  $HOM(i, j)$  dB mayor que el recibido desde la celda  $i$ ,  $P_{rx}(i)$ . En estas condiciones, si existe colisión en la interfaz radio, la relación señal-a- interferencia recibida por el usuario, definida como la diferencia entre los niveles de señal de la celda servidora y de sus adyacentes, es (como máxi-



mo)  $-HOM(i, j)$  dB (es decir, la máxima relación señal-a-interferencia coincide con el margen de traspaso si existe colisión). Cuando, como consecuencia del reparto de tráfico, se aumenta  $HOM(i, j)$ , la diferencia entre las señales piloto recibidas de ambas celdas en el punto donde se dispara el traspaso (punto B en la figura) se incrementa. De esta manera, se empeora significativamente las condiciones de interferencia.

Un análisis más detallado demuestra que el efecto de estos cambios depende de la dirección del enlace radio:

- En el enlace descendente, tras el reparto de tráfico, los usuarios de borde de la celda infrautilizada  $i$  (punto B en la Figura 3.1) están más lejos de su estación base servidora y más cerca de su mayor fuente de interferencia. El resultado es que los usuarios en B reciben un menor nivel de señal deseada y un mayor nivel de interferencia desde la celda  $j$ , que, además, está muy cargada, con lo que la probabilidad de colisión radio es alta. En consecuencia, los indicadores de calidad del canal descendente empeoran en las celdas que reciben tráfico (celda  $i$  en el caso de la Figura 3.1) cuando se aplica el reparto de tráfico cambiando  $HOM$ . Este deterioro de la calidad del enlace descendente no se produce en la celda congestionada  $j$ , ya que en este caso el borde se acerca a la estación base servidora.
- La calidad de conexión también se deteriora en el enlace ascendente. Los usuarios que se envían desde la celda  $j$  hacia la celda  $i$ , como resultado del reparto de tráfico (área sombreada entre los puntos A y B en la Figura 3.1) necesitan transmitir con mayor potencia, lo que causa un mayor nivel de interferencia en el enlace ascendente de la celda  $j$ . Por consiguiente, los indicadores de calidad del canal ascendente empeoran en las celdas que envían tráfico (celda  $j$  en la Figura 3.1) con el reparto de tráfico basado en márgenes. Este deterioro de la calidad en el canal ascendente no se produce en la celda que recibe el tráfico, ya que los usuarios que eran su principal fuente de interferencia (los usuarios en el borde de la celda vecina) son ahora servidos por ésta.

Los efectos descritos tienen un gran impacto en diversos indicadores de rendimiento de la red, entre los que se encuentran la tasa de conexiones caídas (*Connection Dropping Ratio, CDR*), definida a nivel de celda, y la tasa de traspasos fallidos (*HO Failure Ratio, HFR*), definida a nivel de adyacencia:

- Por un lado, el aumento del área de servicio de la celda infrautilizada  $i$  tras el cambio de márgenes provoca que los nuevos usuarios en su borde (área sombreada en la Figura 3.1) experimenten peores condiciones de interferencia en el canal descendente. Ello conlleva un incremento de la *CDR* en la celda que recibe tráfico (celda  $i$  donde se aumenta  $HOM(i, j)$ ). Asimismo, en el enlace ascendente, el cambio de márgenes de traspaso provoca un aumento del nivel de interferencia para los usuarios en la celda  $j$ , que causa que la *CDR* también se incremente en la celda que envía tráfico (es decir, celda  $j$ , donde se disminuye  $HOM(j, i)$ ).

- Por otro lado, tras modificar los márgenes, los traspasos desde la celda  $i$  hacia la celda  $j$  se llevan a cabo en peores condiciones radio, ya que, al retrasar el traspaso, el nivel recibido desde la celda servidora  $i$  es menor y el nivel de interferencia en el canal descendente recibido desde  $j$  es mayor. Como consecuencia, se produce un aumento de  $HFR$  en la adyacencia que tiene como origen la celda que recibe tráfico (celda  $i$ ). De manera similar, es también más probable que se produzcan traspasos fallidos en la adyacencia que tiene como origen la celda que envía tráfico (celda  $j$ ), debido a que el nivel de interferencia en el enlace ascendente de la misma es mayor.

Las degradaciones descritas pueden llegar a ser tan grandes que las mejoras en los indicadores de tráfico obtenidas por el alivio de congestión pueden no compensar el deterioro producido en la  $CDR$  y la  $HFR$ . Por ello, es muy importante llevar a cabo el reparto de tráfico evitando una degradación excesiva de la calidad de los enlaces ascendente y descendente. Esta restricción limita el potencial de las técnicas de reparto de tráfico.

### 3.2.2.1. Prueba de campo preliminar

En el contexto de este trabajo, se ha realizado un experimento de balance de carga en una red real LTE. La zona geográfica considerada cubre un área de 1000 km<sup>2</sup>, que comprende zonas urbanas de alta densidad de población y zonas rurales. En el área de estudio existen 713 macroceldas, que incluyen 2 portadoras en 734 MHz y 2.123 GHz con un ancho de banda de 10 MHz y 5 MHz, respectivamente.

Inicialmente, todas las adyacencias se configuran con un  $HOM$  por defecto de 4 dB. Algunas de las celdas sufren problemas de congestión como consecuencia de la distribución irregular del tráfico. Para resolver estos problemas, se aplica un algoritmo clásico de reparto de tráfico basado en la modificación del  $HOM$ , similar al propuesto en [12]. En dicho algoritmo, se trata de equilibrar los problemas de congestión entre celdas vecinas aumentando (disminuyendo) los márgenes de traspaso hacia (desde) las celdas congestionadas. Los cambios en los márgenes se realizan de forma progresiva en pasos de 1 dB, limitando su variación máxima a 3 dB respecto a su valor original. Para mantener la histéresis constante en cada par de adyacencias, la variación de los márgenes realizada es de igual magnitud y sentido contrario en todas las adyacencias.

El proceso de ajuste del  $HOM$  se realiza durante 3 semanas (semanas 1-3). Los cambios de  $HOM$  se deciden a partir de las estadísticas del día, implementándose al final de cada día laborable. En una cuarta semana (semana 4), la configuración de los márgenes se mantiene constante y, por último, en una quinta semana (semana 5) la configuración de los márgenes se revierte a su valor original. Para evaluar el rendimiento de la técnica de reparto de tráfico, se comparan dos periodos: a) tres días (Miércoles, Jueves y Viernes) de la semana 4, para medir el rendimiento de la red tras el proceso de optimización (configuración optimizada), y b) los mismos tres días de la semana 5, para medir el rendimiento de la red antes del proceso de optimización (configuración original).

Para facilitar el análisis de los datos, las celdas se clasifican en seis grupos, algunos de ellos solapados entre sí:

- Grupo  $R$  (de recibir). Celdas que solo reciben tráfico durante el proceso de optimización para lo cual aumentan sus márgenes de traspaso hacia celdas vecinas. Una celda  $i$  pertenece al grupo  $R$  si, al final del proceso de optimización,  $HOM(i, j) \geq 4$  para toda adyacente de  $i$ , y  $HOM(i, j) > 4$  para al menos una adyacente de  $i$  (recuérdese que 4 dB es el valor por defecto).
- Grupo  $R+$ . Es un subgrupo de  $R$  que comprende las celdas de  $R$  que más han incrementado sus márgenes. Una celda  $i$  se incluye en el grupo  $R+$  si al final del proceso de optimización pertenece al grupo  $R$  y, además,  $HOM(i, j) \geq 6$  para al menos 3 de sus adyacencias.
- Grupo  $E$  (de enviar). Celdas que solo envían tráfico durante el proceso de optimización, para lo que disminuyen sus márgenes de traspaso. Una celda  $i$  está incluida en el grupo  $E$  si al final del proceso de optimización  $HOM(i, j) \leq 4$  para toda adyacente de  $i$ , y  $HOM(i, j) < 4$  para al menos una adyacente de  $i$ .
- Grupo  $E+$ . Es un subgrupo de  $E$  que comprende las celdas de  $E$  que más han disminuido sus márgenes. Una celda  $i$  está incluida en el grupo  $E$  si al final del proceso de optimización pertenece al grupo  $E$ , y además  $HOM(i, j) \leq 2$  para al menos 3 de sus adyacencias.
- Grupo  $NENR$ . Celdas que no tratan de enviar ni de recibir tráfico durante el proceso de optimización. Una celda  $i$  está incluida en el grupo  $NENR$  si al final del proceso de optimización  $HOM(i, j) = 4$  para toda adyacente de  $i$ .
- Grupo  $ER$ . Celdas que envían y reciben tráfico durante el proceso de optimización. Una celda  $i$  está incluida en el grupo  $ER$  si al final del proceso de optimización  $HOM(i, j) < 4$  y  $HOM(i, k) > 4$  para al menos una adyacente  $j$  y una adyacente  $k$ .

Para analizar el impacto del reparto del tráfico, se recopilan dos indicadores de bajo nivel: a) el nivel de interferencia por PRB en el canal compartido de datos ascendente (*Physical Uplink Shared Channel*, PUSCH),  $I_{UL,PRB}$ , como una medida de la calidad de conexión del canal ascendente, y b) el CQI, como medida de la calidad del enlace descendente. Para valorar el desempeño de la técnica, se usan los indicadores de alto nivel previamente descritos: la  $CDR$  (a nivel de celda) y la  $HFR$  (a nivel de adyacencia). Todos estos indicadores se recogen en el periodo previo a la reversión (configuración optimizada) y tras la misma (configuración original).

En primer lugar, se analizan los problemas de congestión iniciales y se comprueba cómo éstos se han mitigado en cierta medida. Con la configuración original de los márgenes, la tasa media de utilización de PRB en el área era del 28.55 % en

la hora de máxima ocupación, y los valores de los percentiles del 5 % y 95 % eran de 6.46 % y 61.69 % respectivamente. Además, en 47 de las 713 celdas se producía un número significativo de fallos de establecimiento de conexión de control de recursos radio (*Radio Resource Control*, RRC) debido a una carga excesiva de celda. Estos datos son una clara evidencia de que la distribución irregular del tráfico original está provocando problemas de congestión que hacen necesaria la aplicación de técnicas de reparto de tráfico. Tras la optimización, el número de conexiones iniciadas en las celdas del grupo  $R$  y  $R+$  se incrementan en un 3.56 % y un 10.59 %, y decrece en los grupos  $E$  y  $E+$  en un 3.52 % y un 15.88 % respectivamente. Por tanto, se confirma que los cambios de los márgenes modifican la distribución del tráfico de forma apropiada. Este reajuste de la distribución de tráfico se aprecia en el número máximo de usuarios que han de servirse simultáneamente en una celda, que se reduce en un 40 %, lo que es una clara evidencia de que las celdas más congestionadas han sido descargadas significativamente. Como consecuencia, el número de conexiones RRC fallidas debido a alta carga se reduce en un 80 %, lo que es una clara muestra de los beneficios que se obtienen del reparto de tráfico.

Sin embargo, la redistribución del tráfico se consigue a costa de incrementar la interferencia. La Figura 3.3 muestra la función de distribución acumulada del indicador  $I_{UL,PRB}$  para las celdas del grupo  $E$  antes y después del proceso de optimización. Como referencia de comparación, se presenta también la misma función para las celdas del grupo  $NENR$ , que no han modificado sus márgenes. En la figura, se observa que la interferencia en el canal ascendente empeora para las celdas del grupo  $E$ , mientras que no lo hace (incluso mejora levemente) para el grupo  $NENR$ . Específicamente, la media y el percentil 95 del indicador  $I_{UL,PRB}$  después de la optimización para las celdas del grupo  $E$  son -115.09 y -108.79 dBm, respectivamente, comparado con los valores previos de -114.61 y -108.25 dBm. Cabe destacar que una diferencia de menos de 1 dB en los dos indicadores, aunque pueda parecer despreciable, tiene un impacto muy negativo sobre los usuarios de borde de celda que están transmitiendo al máximo de su potencia en el canal ascendente. La experiencia demuestra que estos leves incrementos de interferencia pueden aumentar notablemente la tasa de pérdida de conexión.

La calidad del enlace descendente también se deteriora. En la Figura 3.4 se muestra la función de distribución del CQI para las celdas de los grupos  $R$  y  $NENR$  antes y después del proceso de optimización. Se observa que la función se desplaza hacia la izquierda tras el proceso de optimización en las celdas del grupo  $R$ , lo que indica que las celdas de este grupo empeoran la calidad del enlace descendente. Más específicamente, el CQI medio en el grupo  $R$  varía de 9.11 a 8.72 y el percentil del 5 % varía de 4.03 a 3.51. Por el contrario, en las celdas del grupo  $NENR$  (celdas que no han modificado sus márgenes) la curva se mantiene.

El empeoramiento de la calidad mostrado en las Figuras 3.3 y 3.4 se refleja en los dos indicadores de alto nivel analizados, la  $CDR$  y la  $HFR$ . La Tabla 3.1 muestra la  $CDR$  global antes y después del proceso de optimización,  $CDR_{original}$  y  $CDR_{optimizada}$ , en los distintos grupos de celdas. La tabla también incluye las variaciones relativas de la  $CDR$ ,  $\Delta CDR = (CDR_{optimizada} - CDR_{original}) / CDR_{original}$ , y el número de celdas que forman cada grupo. Se observa que todos los grupos

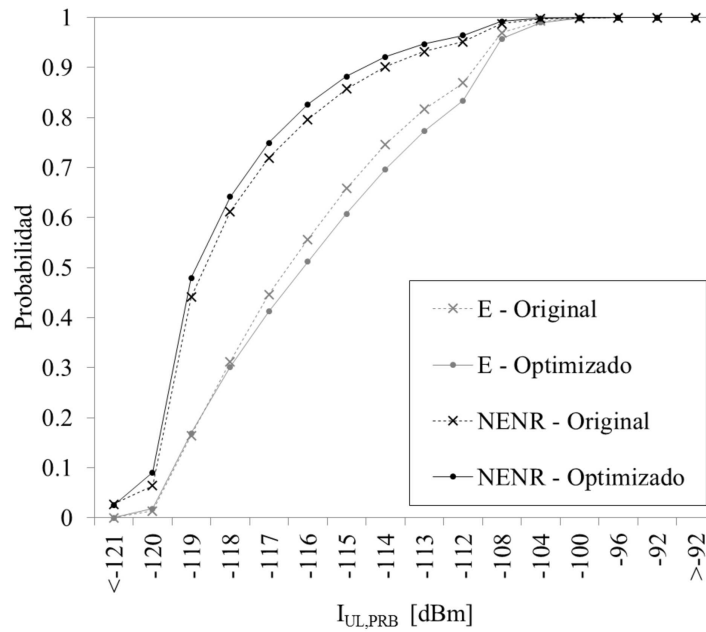


Figura 3.3: Función de distribución acumulada de la interferencia en el enlace ascendente para celdas que envían tráfico.

Tabla 3.1: Estadísticas de tasa de conexiones caídas.

Grupo	R	R+	E	E+	NENR	ER
Número de celdas	261	27	86	33	29	337
$CDR_{original}[\%]$	0.14	0.11	0.26	0.22	0.16	0.18
$CDR_{optimizada}[\%]$	0.20	0.21	0.29	0.27	0.15	0.24
$\Delta CDR[\%]$	44.4	84.8	13.1	19.4	-11.4	35.2

cuyas celdas han modificado sus  $HOM$  (es decir,  $ER$ ,  $R$ ,  $R+$ ,  $E$  y  $E+$ ) han empeorado su  $CDR$ . Las celdas que reciben tráfico (grupo  $R$ ) incrementan su  $CDR$  de un 0.14% a un 0.20% tras el proceso de optimización (es decir, un incremento relativo del 44.4%). Este aumento es aún mayor en las celdas del grupo  $R+$ , donde el incremento relativo es del 84.8%. Estos resultados prueban el impacto negativo que tiene la degradación de la calidad del enlace descendente en el borde de celda en el rendimiento de la red. Las celdas que envían tráfico también aumentan su  $CDR$ , con un incremento relativo del 13.1% y 19.4% en los grupos  $E$  y  $E+$ , respectivamente. El incremento de  $CDR$  en los grupos de celdas que envían tráfico es debido al aumento de la interferencia en el canal ascendente que se produce en estas celdas tras el proceso de optimización. Por el contrario, con el deterioro que se producen en los grupos anteriores, el grupo de celdas que no ha modificado sus márgenes (grupo  $NENR$ ) mejora su  $CDR$  ligeramente, con un decremento relativo del 11.4%.

La Tabla 3.2 muestra los valores de  $HFR$  clasificando las adyacencias por su valor de  $HOM$  al final del proceso de reparto de tráfico (recuérdese que el valor

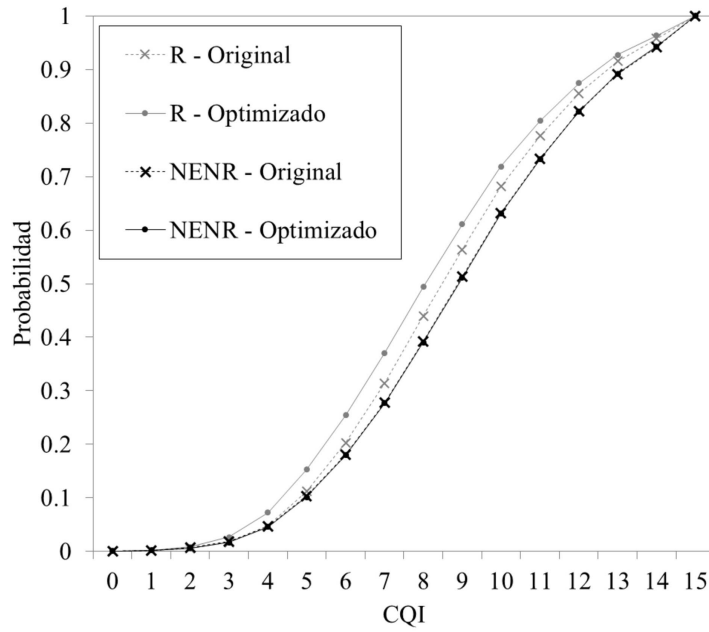


Figura 3.4: Función de distribución acumulada del indicador de calidad del canal descendente para celdas que reciben tráfico.

Tabla 3.2: Estadísticas de tasa de traspasos fallidos.

$HOM(i, j)_{optimizado}$ [dB]	1	2	3	4	5	6	7
Número de adyacencias	547	303	443	2767	413	290	563
$HFR_{original}$ [%]	0.35	0.41	0.47	0.92	0.45	0.35	0.31
$HFR_{optimizada}$ [%]	0.68	0.80	0.74	1.09	0.58	0.57	0.57
$\Delta HFR$ [%]	97.5	93.7	57.9	17.6	27.5	63.8	81.4

de  $HOM$  antes de la optimización era de 4 dB para todas las adyacencias). Se presenta el valor de  $HFR$  antes del proceso de optimización, el valor de  $HFR$  tras el proceso de optimización y su incremento relativo,  $\Delta HFR = (HFR_{optimizada} - HFR_{original}) / HFR_{original}$ . Puede observarse que se produce una degradación global de la  $HFR$ , ya que el valor de  $HFR$  tras el proceso de optimización es mayor en todos los grupos de adyacencias. Como se esperaba, esta degradación es mayor cuanto mayor es el incremento de  $HOM$  respecto a su valor original. En concreto, las adyacencias con una variación de  $HOM$  de -3, -2 y 3 dB ( $HOM$  final de 1, 2 y 7 dB) presentan un incremento relativo de  $HFR$  del 97.5%, 93.7% y 81.4% respectivamente.

Estos resultados demuestran que, en LTE, los algoritmos de reparto de tráfico que cambian los márgenes de traspaso producen una degradación significativa de la calidad del enlace radio, que se manifiesta en indicadores de bajo nivel como el  $I_{UL,PRB}$  y el CQI, y que se traducen en un deterioro significativo de indicadores de rendimiento tan importantes como la  $CDR$  y la  $HFR$ . De estos resultados, puede concluirse que los algoritmos de reparto de tráfico empleados en otras tecnologías

no son directamente aplicables en LTE. En la siguiente sección, se presentan nuevos algoritmos de reparto de tráfico mediante traspaso para femtoceldas LTE. En su diseño y validación, se ha prestado especial atención a la degradación producida por el desplazamiento de márgenes de traspaso.

### 3.3. Diseño de técnicas de reparto de tráfico para femtoceldas LTE

En esta sección se describe el diseño y la implementación de los algoritmos de reparto de tráfico para femtoceldas LTE propuestos en esta tesis. Los algoritmos han sido concebidos para modificar parámetros de la femtocelda a partir de estadísticas de rendimiento disponibles en el sistema de gestión de red.

#### 3.3.1. Estructura general de los algoritmos

Los algoritmos de balance de carga clásicos utilizados en GSM y UMTS deben adaptarse para realizar reparto de tráfico en un escenario de femtoceldas LTE de acceso abierto. El objetivo de los métodos presentados aquí es resolver problemas de congestión localizados en el espacio y persistentes en el tiempo, mediante la igualación del porcentaje de llamadas bloqueadas en todas las celdas de la red. Las técnicas de reparto de tráfico diseñadas en este trabajo se basan en el ajuste de dos parámetros de las femtoceldas: los márgenes de traspaso,  $HOM$ , y la potencia transmitida,  $P_{TX}$ . El ajuste de estos parámetros se lleva a cabo periódicamente por medio de controladores. Dado que el margen de traspaso se define por adyacencia, es necesario un controlador por cada adyacencia en la red. Por la misma razón, se requiere un controlador por cada femtocelda para ajustar la potencia transmitida. La entrada a dichos controladores son las estadísticas de rendimiento y la configuración previa de parámetros, disponible en el sistema de gestión de red.

El objetivo de los algoritmos diseñados es minimizar la diferencia de tasa de bloqueo de llamadas,  $BR$  (*Blocking Ratio*), entre femtoceldas adyacentes. Se considera que se ha alcanzado el equilibrio, y, por tanto, finalizan los cambios de parámetros, cuando la diferencia de  $BR$  entre femtoceldas adyacentes es despreciable.

Dado que el objetivo es resolver problemas de congestión persistentes en el tiempo, y no fluctuaciones temporales de la demanda de tráfico, los indicadores de red utilizados para decidir los cambios de parámetros se calculan agregando medidas durante periodos relativamente largos. Por ello, el periodo mínimo de actuación de los controladores es grande (p.ej., de más de 15 minutos, que es el periodo con el que se actualizan las medidas en el sistema de gestión de red). No obstante, este periodo puede reducirse siempre y cuando se garantice que las medidas son significativas del estado actual de la red.

El proceso de ajuste de los parámetros de la red se lleva a cabo de la siguiente forma. En cada intervención del controlador, denominada lazo de optimización, se calcula el valor de los indicadores de red y se consulta la configuración actual de los parámetros para el periodo considerado. A partir de esta información, el controlador decide una nueva configuración para el parámetro optimizado e implementa los cambios necesarios. Este proceso se repite en cada lazo para cada adyacencia cuando se optimiza  $HOM$ , o para cada femtocelda cuando se optimiza  $P_{TX}$ . En los siguientes apartados se describen tres algoritmos que ajustan de forma individual o conjunta los márgenes de traspaso y la potencia de transmisión de la femtocelda.

### 3.3.1.1. Algoritmo de reparto de tráfico mediante traspaso

El controlador MTS (*Margin Traffic Sharing*) modifica los márgenes de traspaso en una adyacencia,  $HOM(i, j)$ . El objetivo es equilibrar  $BR$  entre la femtocelda origen y la femtocelda destino de la adyacencia. Para evitar inestabilidades, el algoritmo mantiene la región de histéresis en la adyacencia y, por tanto, el área de solapamiento entre ambas femtoceldas. Para ello, las modificaciones llevadas a cabo en los dos sentidos de la adyacencia son de la misma magnitud, pero de signo contrario, tal como refleja la ecuación:

$$HOM(i, j) + HOM(j, i) = Hist, \quad (3.2)$$

donde  $Hist$  es una constante que define el valor de histéresis. En este trabajo, el valor de histéresis es de 6 dB, por lo que el valor por defecto de  $HOM(i, j)$  es 3 dB  $\forall i, j$ .

Los cambios realizados por MTS pueden estar restringidos de forma que el nuevo valor del margen deba estar dentro del intervalo de valores permitidos. Con ello, se evita una degradación excesiva de la calidad de la conexión, como se explica más adelante. Esta variante del algoritmo que incluye restricciones para los valores de los márgenes se denomina MTSFC (*Margin Traffic Sharing Fixed Constrained*).

Cada modificación de  $HOM(i, j)$  realizada por MTS (o MTSFC) equivale a un desplazamiento de la frontera entre las femtoceldas  $i$  y  $j$ . El efecto de esta técnica es acercar la frontera entre celdas a la femtocelda con mayor  $BR$ , para así desplazar tráfico a la femtocelda con menor  $BR$ . En el apartado 3.3.2 se realiza una descripción detallada de cómo se implementa el controlador que lleva a cabo esta operación.

### 3.3.1.2. Algoritmo de reparto de tráfico mediante potencia

El controlador PTS (*Power Traffic Sharing*) modifica la potencia de transmisión de una femtocelda,  $P_{TX}$ , tanto para las señales piloto como para los canales de control y de datos. El objetivo, al igual que en el caso anterior, es equilibrar el



valor de  $BR$  de la femtocelda objeto del cambio y el valor medio de  $BR$  de todas sus femtoceldas vecinas. Las femtoceldas comienzan con su  $P_{TX}$  configurada a su valor por defecto y en cada lazo de optimización se disminuye (o incrementa) si su  $BR$  es mayor (o menor) que el de sus celdas vecinas.

En este trabajo se considera que la potencia máxima de una femtocelda está limitada a su valor inicial, ya que es la configuración más habitual en la red. Por simplicidad, no hay ningún tipo de sincronización entre los cambios de potencia de una femtocelda y sus vecinas, por lo que las condiciones de cobertura y el solapamiento entre celdas puede verse afectado con el algoritmo PTS. Asimismo, se asume que tanto la  $P_{TX}$  para transferencia de datos como la  $P_{TX}$  para señales piloto se modifican conjuntamente. Al modificar también la potencia de las señales piloto, el reparto de tráfico se lleva a cabo no sólo para los usuarios conectados (usuarios con conexión activa), sino también para los usuarios ociosos (usuarios sin conexión activa). De esta manera, los cambios tienen efecto tanto en el proceso de traspaso como en el proceso de reelección.

Cada modificación de  $P_{TX}(i)$  realizada por PTS equivale a un desplazamiento de la frontera entre la femtocelda  $i$  con todas sus femtoceldas vecinas. El modo de funcionamiento de esta técnica es acercar la frontera a la femtocelda objeto del cambio si su  $BR$  es mayor que la media de  $BR$  de sus vecinas, para así enviar tráfico hacia todas ellas. En el apartado 3.3.2 se realiza una descripción detallada de cómo se implementa el controlador que lleva a cabo esta operación.

### 3.3.1.3. Algoritmo de reparto de tráfico mediante traspaso y potencia

Las estrategias anteriores pueden combinarse para aumentar la capacidad de reparto de tráfico entre las femtoceldas. Parece lógico pensar que ejecutando MTS y PTS de forma simultánea, pero independiente, se pueden incrementar tanto la velocidad de adaptación como el rendimiento final de la red. Además, como se muestra más adelante, coordinando ambos algoritmos es posible superar los límites inherentes a cada técnica individual. Se define así la técnica coordinada CTS (*Combined Traffic Sharing*).

CTS modifica la potencia transmitida de una femtocelda y los márgenes de traspaso de sus adyacencias. Para realizar este proceso, CTS implementa en cada celda un controlador PTS y varios controladores MTSFC (uno por adyacencia). Todos los controladores en una femtocelda se ejecutan de forma coordinada. La Figura 3.5 refleja el funcionamiento del algoritmo CTS. Primero, MTSFC modifica los márgenes de traspaso mientras PTS está desactivado. Solo cuando todos los controladores MTSFC en esa femtocelda han alcanzado sus límites (bien porque el margen de traspaso ha llegado a su valor máximo o mínimo, o bien porque la diferencia de  $BR$  en esa adyacencia es poco significativa), PTS se habilita para modificar la potencia de transmisión de la femtocelda. Estas condiciones se pueden expresar de manera formal diciendo que PTS se activa sólo si

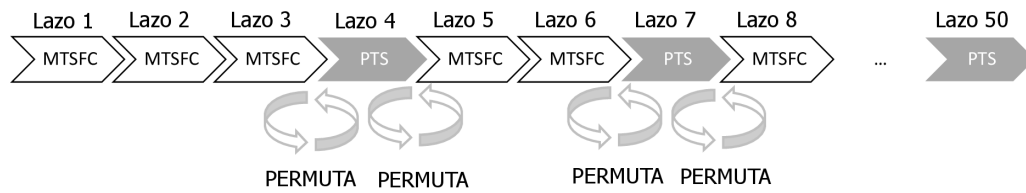


Figura 3.5: Funcionamiento de la estrategia CTS.

$$HOM(i, j) \leq -6.9 \quad | \quad HOM(i, j) \geq 12.9 \quad | \quad \Delta BR(i, j) < 0.02 \quad \forall j \in N(i), \quad (3.3)$$

donde ' $|$ ' es el conector lógico de disyunción (es decir, la conjunción 'o'), y  $\Delta BR(i, j)$  es la diferencia de  $BR$  entre las femtoceldas  $i$  y  $j$  en valor absoluto. De la expresión se deduce que, para conmutar de MTSFC a PTS en la femtocelda  $i$ , al menos una de las tres condiciones debe cumplirse para todas las adyacencias de  $i$ . Obviamente, la primera y la segunda condición no pueden cumplirse de forma simultánea para una misma adyacencia. Sin embargo, diferentes adyacencias pueden cumplir diferentes condiciones.

Mediante la coordinación de las técnicas PTS y MTS, se consigue realizar el reparto de tráfico con una desviación menor de la potencia de transmisión de la femtocelda. De esta manera, se alteran menos las condiciones de cobertura de la red, reduciendo el riesgo de producir llamadas caídas durante el reparto de tráfico.

### 3.3.2. Implementación de los controladores

En este trabajo se utiliza una estructura de controlador incremental, donde la salida del controlador es el cambio (o incremento) del parámetro ajustado, que se suma a su valor previo para obtener el nuevo valor.

Para simplificar su diseño, los controladores se implementan mediante controladores de lógica difusa. Los controladores de lógica difusa [56] son sistemas expertos descritos mediante reglas sencillas del tipo "SI... ENTONCES...". Debido a que los controladores de lógica difusa se definen en términos lingüísticos, resulta fácil integrar en el controlador el conocimiento previo de un operador. Los controladores difusos son, por tanto, especialmente útiles cuando el operador ya tiene cierta experiencia, como es el caso de las redes de telecomunicaciones. La principal diferencia entre los controladores de lógica difusa y los controladores basados en reglas convencionales es la capacidad del primero para disparar varias reglas simultáneamente, lo que consigue que las acciones llevadas a cabo por el controlador sean menos bruscas.

Un controlador de lógica difusa está compuesto por tres etapas: *fusificación*, *inferencia* y *defusificación*. En la etapa de *fusificación*, el valor numérico de cada

variable de entrada se clasifica en un conjunto limitado de adjetivos (p.ej., alto, bajo...) por medio de unas funciones de pertenencia, que definen el grado con el que cada entrada puede asociarse a cada adjetivo. Es importante resaltar que, al contrario que en los controladores convencionales, un solo valor de entrada puede asociarse a más de un adjetivo con diferentes grados de asociación (de ahí, el término “difuso”). En este trabajo, el número de funciones de pertenencia ha sido elegido suficientemente alto para clasificar los indicadores de rendimiento con la precisión con la que lo haría un operador experto, pero suficientemente bajo como para mantener un espacio de reglas reducido y manejable. Por simplicidad, las funciones de pertenencia utilizadas son trapezoidales, triangulares o constantes.

En la máquina de inferencia se definen un conjunto de reglas de tipo “SI...ENTONCES...” para obtener las salidas a partir de las entradas. Así, cada regla propone una acción a la salida en función del valor de sus entradas. Cada una de las reglas se dispara con distinta fuerza en función del cumplimiento de sus antecedentes.

Por último, en la etapa de *defusificación*, el valor de salida se obtiene a partir de la agregación de las acciones que propone cada una de las reglas. En este trabajo, la agregación se realiza usando el método del centro de gravedad [56]. En esta agregación influye el peso de cada regla, que se calcula en función del grado de activación de dicha regla. Por simplicidad, todos los controladores de este trabajo están diseñados basándose en la aproximación Takagi-Sugeno, donde las funciones de pertenencia de salida son deltas. Al igual que para las entradas, el número de funciones de pertenencia para las salidas se ha seleccionado suficientemente grande para permitir un control fino de los parámetros de configuración.

A continuación, se detallan los controladores MTS y PTS. En el caso de MTS, se añaden dos variantes que consideran la inclusión de un freno que evite la degradación de la calidad de conexión producida por el reparto de tráfico.

### 3.3.2.1. Controlador MTS

La Fig. 3.6 refleja el controlador difuso del algoritmo MTS. Como se observa en la figura, el controlador tiene dos entradas. La primera es la diferencia del indicador de  $BR$ , calculado como

$$\Delta BR^{(n)}(i, j) = BR^{(n)}(i) - BR^{(n)}(j), \quad (3.4)$$

donde  $\Delta BR(i, j)$  es la diferencia de  $BR$  para la adyacencia  $(i, j)$ , y  $BR(i)$  y  $BR(j)$  son los valores de la tasa de bloqueo en las femtocelda  $i$  y  $j$ . La segunda entrada es el valor actual del margen de traspaso en la adyacencia,  $HOM(i, j)$ . La salida del controlador es el cambio a realizar en el margen de traspaso,  $\Delta HOM$ .

La salida del controlador se suma al valor anterior, y el resultado se redondea al entero más cercano, como

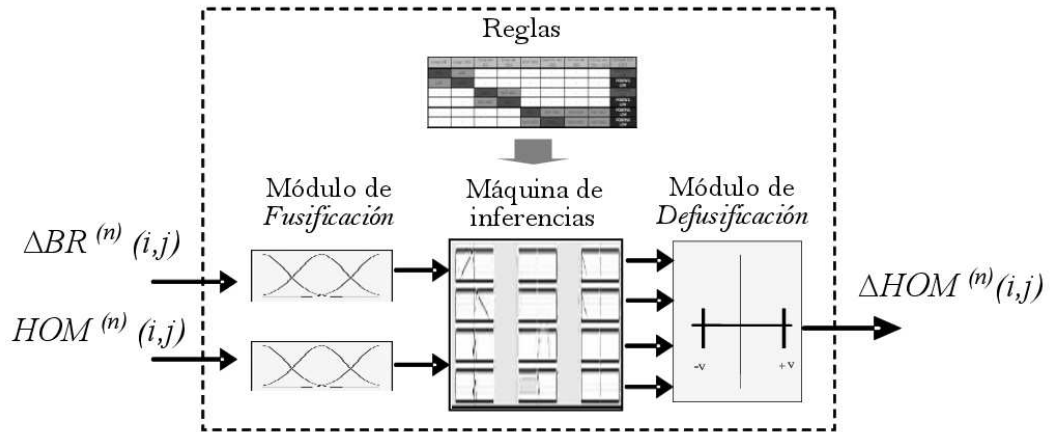


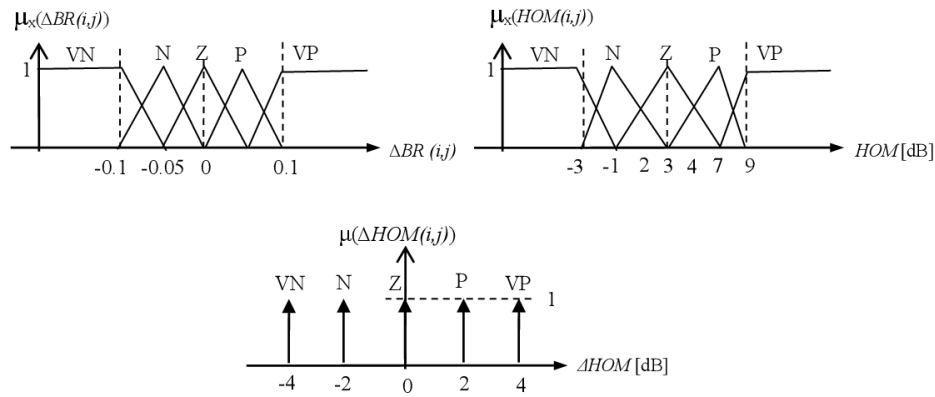
Figura 3.6: Estructura del controlador MTS.

$$HOM^{(n+1)}(i, j) = \text{round} (HOM^{(n)}(i, j) + \Delta HOM^{(n)}(i, j)), \quad (3.5)$$

donde  $HOM(i, j)$  es el margen de traspaso entre la femtocelda  $i$  y la femtocelda  $j$ ,  $\Delta HOM(i, j)$  es el incremento propuesto por el controlador de lógica difusa y el superíndice  $n$  indica el lazo de optimización. El proceso de redondeo asegura una variación mínima de 1 dB, lo que evita variaciones de menor magnitud que puedan tener un impacto despreciable en el área de cobertura de la femtocelda.

La Figura 3.7 muestra las funciones de pertenencia y las reglas del controlador MTS. En la Figura 3.7 (a) se representan las funciones de pertenencia para las entradas  $\Delta BR$  y  $HOM$ , y la salida  $\Delta HOM$ . Los términos VN, N, Z, P y VP describen los calificativos muy negativo, negativo, cero, positivo y muy positivo, respectivamente. Así, se considera que la diferencia de bloqueo es muy positiva si la diferencia de tasa de bloqueo es mayor de 0.1 (10%), y empieza a ser despreciable si es menor que 0.05 (5%). Asimismo, se considera que  $HOM$  es demasiado alto si es mayor de 9 dB, y demasiado bajo si es menor de -3 dB. Por último, una variación muy grande de  $HOM$  a la salida se considera 4 dB, y moderada como 2 dB. Como puede apreciarse, las funciones de pertenencia de cada variable mantienen cierta relación de simetría. De esta manera, se consigue que los cambios de margen en ambos sentidos de la adyacencia sean simétricos, manteniendo así el valor de histéresis.

La Figura 3.7 (b) muestra el conjunto de reglas definidas para el algoritmo MTS. Por ejemplo, la primera regla se lee como: “SI la diferencia de bloqueo es muy positiva, ENTONCES el cambio de margen de traspaso debe ser muy negativo”. A grandes rasgos, cuanto más positiva (negativa) sea la diferencia de bloqueo, más negativo (positivo) es el incremento del margen de traspaso. Las cuatro últimas reglas implementan un mecanismo de retorno lento para restaurar



(a) Funciones de pertenencia

$\Delta BR(i,j)$	$HOM(i,j)$	$\Delta HOM(i,j)$
VP	-	VN
P	-	N
N	-	P
VN	-	VP
Z	VN	P
Z	N	P
Z	P	N
Z	VP	N
Z	Z	Z

(b) Reglas

Figura 3.7: Configuración del controlador MTS.

la configuración por defecto cuando desaparece el desequilibrio de bloqueo, y no es necesario seguir haciendo reparto de tráfico.

### 3.3.2.2. Controlador MTS con freno

El análisis preliminar presentado en el Sección 3.2.2 ha puesto de manifiesto que las técnicas de reparto de tráfico pueden deteriorar significativamente la calidad de conexión ofrecida por las redes LTE. De (3.1), se puede deducir que, como consecuencia del proceso de ajuste de los márgenes de traspaso, éstos pueden alcanzar valores muy negativos. Cuando esto ocurre, los usuarios que se envían a celdas vecinas reciben un nivel de señal muy inferior al que recibían de su celda origen (es decir,  $RSRP(j) \ll RSRP(i)$ ). Como resultado, la *SINR* (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) experimentada por el usuario tras realizar el traspaso puede ser significativamente peor que antes del traspaso (téngase en cuenta que el margen de traspaso es una aproximación del máximo nivel de *SINR* que percibirá el

usuario tras el traspaso en caso de colisión en la interfaz radio). Para evitar este problema, una primera variante del algoritmo MTS denominada MTSFC restringe la variación de los márgenes de traspaso forzando que  $HOM(i, j) > -6.9$  dB. De esta manera, se evita que, después de un traspaso, la  $SINR$  sea menor que -6.9 dB, que es el umbral por debajo del cual el planificador en una estación base no asigna recursos a una conexión. Esta limitación, junto con (3.2), lleva a la siguiente restricción del margen de traspaso:

$$-6.9 \leq HOM(i, j) \leq 6.9 + Hist. \quad (3.6)$$

La imposición de esta restricción limita el deterioro de la calidad de conexión a costa de limitar la capacidad de reparto de tráfico del algoritmo MTS.

Como alternativa, una segunda variante del algoritmo MTS, denominada MTSAC (*Margin Traffic Sharing with Adaptive Constraint*), establece un freno adaptativo en el ajuste de márgenes de traspaso, cuya fuerza de frenado depende de la degradación de la calidad de conexión observada en la red. De esta manera, el desplazamiento de márgenes se interrumpe cuando la degradación global de la calidad de señal experimentada por los usuarios es excesiva.

Para sacar el máximo partido del ajuste de márgenes, la calidad de señal se debe evaluar únicamente para los usuarios que realizan un traspaso, desglosando adyacencia por adyacencia. Para ello, se propone la construcción de un primer indicador de calidad del traspaso a nivel de adyacencia. Este nuevo indicador, denominado  $\overline{SINR}_{HO}$ , refleja el promedio de  $SINR$  medido por los usuarios justo antes de realizar los trasposos en una determinada adyacencia, calculado como

$$\overline{SINR}_{HO}(i, j) = \frac{\sum_{h=1}^{N_{HO}(i, j)} SINR_{HO}(i, j, h)}{N_{HO}(i, j)}, \quad (3.7)$$

donde  $\overline{SINR}_{HO}(i, j)$  es el valor de dicho indicador para la adyacencia  $(i, j)$ ,  $N_{HO}(i, j)$  es el número total de trasposos desde  $i$  a  $j$  durante el periodo de medida y  $SINR_{HO}(i, j, h)$  es el valor de  $SINR$  en el canal descendente medido por el terminal en el instante previo a realizar el traspaso número  $h$  desde  $i$  hasta  $j$ .

La información necesaria para construir el indicador anterior puede extraerse de las trazas de conexión disponibles en el sistema de gestión de red. No procede, como el resto de entradas, de contadores básicos que computan el número de veces que se repite un determinado evento. Para obtener este indicador es necesario realizar un procesamiento de la información disponible en distintas trazas de conexión. Más específicamente, es necesario relacionar el evento de traspaso con el evento de medida de la calidad de conexión previo a ese traspaso.

El indicador descrito sirve para detectar aquellas adyacencias donde una modificación de  $HOM$  conlleva una degradación excesiva de la calidad de la llamada. Con él, se puede medir la calidad de conexión media de los usuarios cercanos al

borde entre las celdas implicadas en el proceso de reparto de tráfico, y permitir el incremento de  $HOM$  solo si su calidad es aceptable. Así, el controlador MTSAC se implementa con un controlador MTSFC que solo realiza los cambios de  $HOM$  para la adyacencia  $(i, j)$  si los valores de  $\overline{SINR}_{HO}(i, j)$  y  $\overline{SINR}_{HO}(j, i)$  son mayores que un cierto umbral,  $\overline{SINR}_{HOmin}$ .

### 3.3.2.3. Controlador PTS

El algoritmo PTS modifica  $P_{TX}$  para igualar la tasa de bloqueo entre celdas vecinas. La Figura 3.8 refleja la estructura del controlador PTS. En ella, se aprecia que la potencia transmitida en la celda  $i$ ,  $P_{TX}(i)$ , se incrementa en  $\Delta P_{TX}(i)$  para reducir la diferencia de bloqueo entre ella y sus vecinas.

Las entradas del controlador de lógica difusa de PTS son la diferencia de bloqueo media, definida como

$$\Delta BR^{(n)}(i) = BR^{(n)}(i) - BR^{(n)}(N(i)) = BR(i) - \frac{\sum_{j \in N(i)} BR^{(n)}(j)}{|N(i)|}, \quad (3.8)$$

donde  $N(i)$  es el conjunto de vecinas de la celda  $i$ ,  $|N(i)|$  es el número de vecinas de la celda  $i$ , y la desviación actual de la potencia transmitida respecto a su valor por defecto,  $Dev_{PTX}^{(n)}(i)$ , se define como

$$Dev_{PTX}^{(n)}(i) = P_{TX}^{(n)}(i) - P_{TX}^{(0)}(i), \quad (3.9)$$

donde el superíndice se refiere al número de iteración, y  $P_{TX}^{(n)}(i)$  y  $P_{TX}^{(0)}(i)$ , son la potencia de transmisión actual e inicial, respectivamente. Conviene llamar la atención de que ambas entradas son indicadores de celda, dado que el parámetro optimizado (la potencia de la femtocelda) se define a nivel de celda. La salida del controlador es el cambio de la potencia de la femtocelda, con el que se calcula el nuevo valor de potencia como

$$P_{TX}^{(n+1)}(i) = round(P_{TX}^{(n)}(i) + \Delta P_{TX}^{(n)}(i)), \quad (3.10)$$

donde  $\Delta P_{TX}^{(n)}(i)$  es la salida del controlador en la iteración  $n$  para la femtocelda  $i$ . La desviación total de potencia siempre será negativa, ya que se asume que el valor original es el de potencia máxima, y mayor que -30 dB para evitar alcanzar valores de  $P_{TX}$  excesivamente bajos. Es decir,  $0 \geq Dev_{PTX} \geq -30$ .

En la Figura 3.9 se representan las funciones de pertenencia y las reglas para el controlador PTS. En la Figura 3.9 (a) se observan las funciones de pertenencia para las entradas  $\Delta BR$  y  $Dev_{PTX}$ , y la salida  $\Delta P_{TX}$ . Como en el controlador MTS, VN, N, Z, P y VP significan muy negativo, negativo, cero, positivo y muy

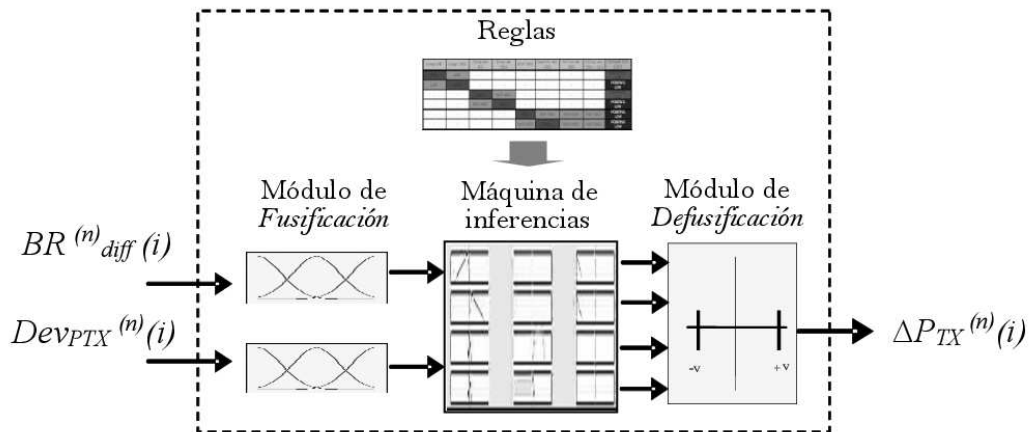


Figura 3.8: Estructura del controlador PTS.

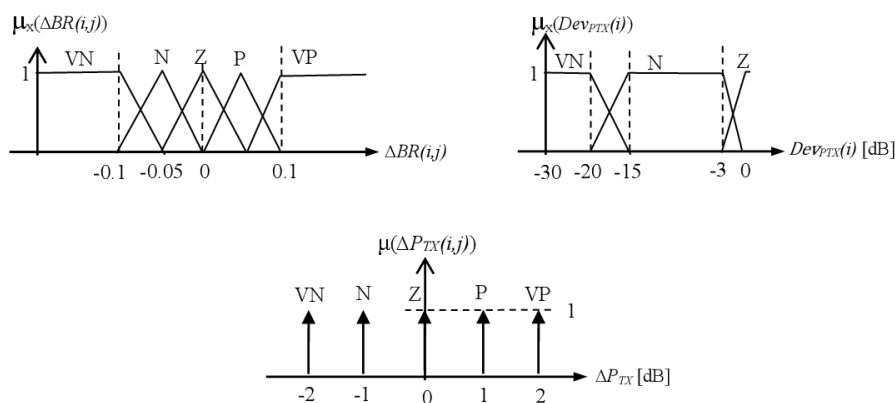
positivo, respectivamente. Así, se considera, que la diferencia de bloqueo de una celda respecto de sus adyacentes es muy positiva si es mayor que 0.1 (10%), y que empieza a ser despreciable si es menor que 0.05 (5%). Asimismo, se considera que  $Dev_{PTX}$  es demasiado negativa si es menor que -20 dB, y no es muy negativa por encima de -3 dB. Por último, 2 dB se considera como una variación muy grande de  $P_{TX}$ , y 1 dB como una variación moderada.

La Figura 3.9 (b) muestra las reglas definidas para el algoritmo PTS. A grandes rasgos, cuanto mayor es el bloqueo en la celda servidora en comparación con el de sus adyacentes, mayor será el decremento en su potencia de transmisión. Como antes, se incluyen dos reglas para que  $P_{TX}$  retorne a su valor por defecto cuando  $\Delta BR$  desaparece (es decir,  $\Delta BR$  se califica como Z). También se incluye una última regla “SI  $\Delta BR$  es Z, ENTONCES  $\Delta P_{TX}$  es Z” que refleja que no es necesario modificar  $P_{TX}$  cuando el nivel de bloqueo en la femtocelda es equivalente al de sus adyacentes.

### 3.4. Pruebas

En esta sección se presentan los experimentos realizados para validar las técnicas de reparto de tráfico en interiores propuestas en esta tesis. El objetivo de los experimentos es entender el funcionamiento de las diferentes técnicas de reparto de tráfico, caracterizar de forma cuantitativa la capacidad de reparto de tráfico de cada una de ellas y estudiar sus ventajas e inconvenientes. Por claridad, se describe primero la metodología experimental y después se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos.





(a) Funciones de pertenencia

$\Delta BR(j)$	$Dev_{PTX}(i)$	$\Delta P_{TX}(i)$
VP	-	VN
P	-	N
N	N	P
N	VN	P
Z	VN	P
Z	N	P
VN	N	P
VN	VN	VP
Z		Z

(b) Reglas

Figura 3.9: Configuración del controlador PTS.

### 3.4.1. Metodología experimental

A continuación se describen la herramienta de simulación, los experimentos realizados y los principales indicadores de rendimiento.

#### 3.4.1.1. Herramienta de simulación

Los experimentos se llevan a cabo en el simulador de red de femtoceldas LTE desarrollado en esta tesis, cuya funcionalidad se describe en el Anexo A. La Figura 3.10 muestra el escenario utilizado. Este escenario (delimitado por un recuadro de línea discontinua en la figura) tiene unas dimensiones de  $3 \times 2.6 \text{ km}^2$ , y consta de un emplazamiento macrocelular con 3 sectores (celdas de línea gruesa en la figura), en cuya área de cobertura se sitúa un edificio de oficinas de dimensiones  $50 \times 50 \text{ m}^2$  (cuadrado de color gris en la figura) con 5 plantas. El posicionamiento y la activación de las femtoceldas en cada planta será distinto en cada uno de los experimentos, como se verá más adelante. Para evitar efectos de borde en sus

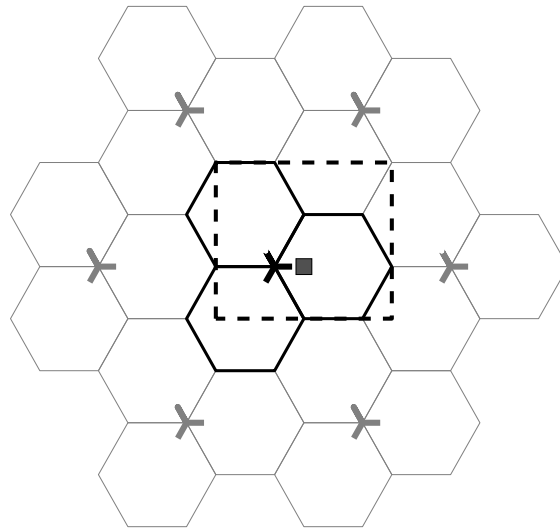


Figura 3.10: Escenario de simulación.

indicadores de rendimiento, el simulador incorpora la técnica de envoltura (*wrap-around*), que replica las celdas del escenario original alrededor del mismo (celdas de línea gris en la figura).

La Tabla 3.3 resume las principales características del simulador y la configuración de sus parámetros en los experimentos. Para simplificar el análisis, el servicio considerado es el de voz sobre IP, y solo se simula el enlace descendente, que suele ser el más restrictivo en términos de capacidad.

### 3.4.1.2. Experimentos

Para evaluar las diferentes técnicas de reparto de tráfico, se definen cinco experimentos de complejidad creciente. Los dos primeros experimentos (experimentos A1 y A2) tratan de mostrar las capacidades y limitaciones de las técnicas de forma individual. En el primero de ellos (A1), se estudia el funcionamiento de estas técnicas cuando el reparto de tráfico es dentro de la misma planta, mientras que en el segundo (A2) se estudia el funcionamiento del reparto entre distintas plantas del edificio. En el tercer experimento (A3) se hace uso de un escenario que refleja un caso extremo, aunque más realista, con múltiples plantas, que permite cuantificar el beneficio de las diferentes técnicas cuando se utilizan de manera individual y conjunta. En el cuarto experimento (A4) se evalúa el comportamiento del freno adaptativo. En el quinto experimento (A5), se evalúa la influencia de la posición de la femtocelda en las técnicas de reparto de tráfico.

Tabla 3.3: Principales parámetros del simulador.

Resolución temporal	100 ms		
Modelos de propagación	interior-interior	Winner II A1 [57]	
	interior-exterior	Winner II A2 [57]	
	exterior-exterior	Winner II C2 [57]	
	exterior-interior	Winner II C4 [57]	
Modelo de estación base	PIRE máxima	13 dBm (femto) 43 dBm (macro)	
	Directividad	omnidireccional (femto) trisectorial (macro)	
	Acceso	abierto (macro/femto)	
Modelo de terminal	Cifra de ruido	9 dB	
	Densidad espectral ruido	-174 dBm/Hz	
Modelo de tráfico	Proceso de llegada	Poisson (tasa 0.42 conexiones/(usuario*hora))	
	Duración llamada	exponencial (media 180 s.)	
Modelo de movilidad	Exterior	3 km/h, dirección aleatoria con envoltura	
	Interior	<i>Random waypoint</i> (extensión del presentado en [58])	
Modelo de servicio	Voz sobre IP	16 kbps	
Modelo de gestión de recursos	Ancho de banda del sistema	6 PRBs (1.4 MHz)	
	Reselección de celda	C1-C2	
	Traspaso	Balance de potencia (PBGT HO) Calidad (Qual HO)	
	Planificador		Tiempo: Round-Robin
			Frecuencia: Best Channel

En cada experimento, las técnicas de optimización se ejecutan durante al menos 25 lazos de optimización, cada uno de los cuales representa 1 hora de tiempo de red. Al final de cada lazo de optimización, los controladores usan las estadísticas de rendimiento para realizar cambios en los parámetros de femtoceldas, basándose en las funciones de pertenencia y las reglas definidas en la Sección 3.3. Tras modificar los parámetros, comienza un nuevo lazo de optimización. Los resultados presentados a continuación demuestran que la duración de cada lazo es lo suficientemente larga para asegurar unas estadísticas de rendimiento fiables, y el número de lazos es lo suficientemente grande para que las técnicas de reparto de tráfico alcancen su régimen permanente.

A continuación se describen en profundidad cada uno de los experimentos, detallando el escenario específico y las técnicas evaluadas en cada uno de ellos.

### 3.4.1.3. Experimento A1: Reparto de tráfico en una misma planta

El primer experimento pretende cuantificar la capacidad de reparto de tráfico de cada una de las técnicas dentro de una misma planta. El escenario considerado, nombrado de aquí en adelante como escenario 1, se muestra en la Figura 3.11. El escenario incluye una única planta con cuatro oficinas iguales, delimitadas en la figura por líneas que representan las paredes. En cada oficina, se incluye una femtocelda (círculo rojo), ubicada de forma simétrica respecto a las otras 3 femtoceldas de la planta. En el dibujo, tanto las oficinas como las femtoceldas se numeran para su mejor identificación.

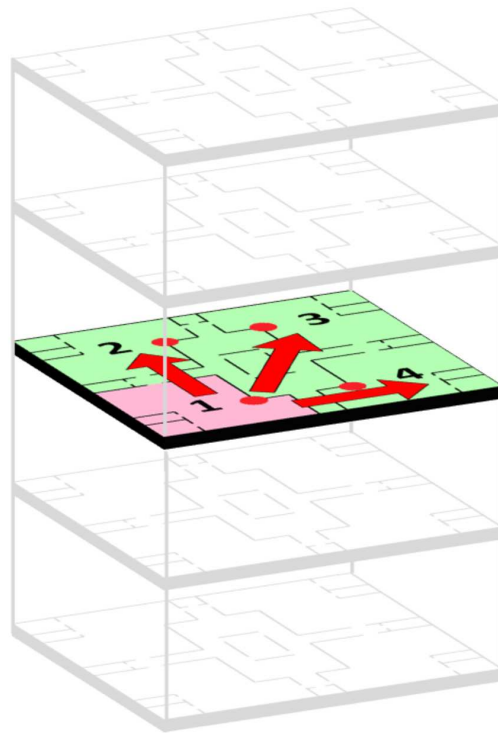


Figura 3.11: Esquema del escenario 1.

Durante la simulación, todos los usuarios se crean únicamente en la oficina donde se ubica una de las fentoceldas (oficina 1), mientras que no se crea ningún usuario en el resto de oficinas (oficinas 2, 3 y 4)<sup>1</sup>. La población de usuarios es lo suficientemente alta como para causar un bloqueo significativo en la fentocelda 1 en el estado inicial (lazo 1), cuando los parámetros aún no se han modificado. Se trata, por tanto, de un caso extremo de reparto de tráfico en una planta, que sirve para calibrar la capacidad de reparto de tráfico de cada una de las técnicas.

En este escenario, se simulan las técnicas MTS y PTS de forma separada hasta alcanzar el régimen permanente (concretamente, 20 lazos de optimización de MTS y 30 de PTS). Los resultados mostrarán la necesidad de restringir la variación de márgenes de traspaso en la técnica MTS, lo que justifica la necesidad de las técnicas MTSFC y MTSAC. Cabe aclarar que, en este escenario, el movimiento de los usuarios no se restringe únicamente al área de servicio de la fentocelda número 1, donde se crean las llamadas, sino que los usuarios pueden moverse libremente por toda la planta durante la llamada. Este movimiento produce un suave efecto de reparto de carga que, sin embargo, es despreciable frente al conseguido mediante la modificación de parámetros de traspaso y potencia.

<sup>1</sup>Por simplificar la redacción, se considera que el área de una oficina cubre también la zona de áreas comunes (distribuidor, pasillos, ...) más próxima a las paredes que delimitan la oficina.

#### 3.4.1.4. Experimento A2: Reparto de tráfico entre diferentes plantas

El segundo experimento pretende buscar las limitaciones de los algoritmos para balancear tráfico entre femtoceldas de distintas plantas. El escenario considerado, denominado escenario 2, se muestra en la Figura 3.12. Dicho escenario está formado por 3 plantas contiguas, con una única femtocelda en cada una de ellas (femtoceldas 1, 2 y 3). Las estaciones base de diferentes niveles se ubican en la misma posición dentro de su planta (es decir, están alineadas verticalmente).

La distribución espacial de usuarios es similar a la del escenario 1, donde todos los usuarios se crean en una única oficina (oficina 1 de la planta central), mientras que no se crean en el resto de oficinas (oficinas 2 y 3). La principal diferencia entre los escenarios 1 y 2 es la mayor separación entre celdas producida por la atenuación del forjado entre plantas (17 dB, según el modelo de propagación descrito en la Tabla A.1 del Anexo A). Fruto de este aislamiento, la diferencia de potencia recibida de las distintas femtoceldas antes del proceso de optimización es mayor en el escenario 2.

En este escenario, se simulan las técnicas MTSFC y PTS de forma separada hasta alcanzar el régimen permanente (20 y 30 lazos de optimización, respectivamente). Al igual que en el escenario 1, el movimiento de los usuarios no se restringe únicamente a la oficina en la que se encuentra la femtocelda 1, donde se inician las llamadas, sino que pueden moverse libremente por toda la planta durante la llamada. Sin embargo, en este caso, este movimiento no conlleva un reparto de tráfico, ya que en ningún caso los usuarios cambian de planta y, por tanto, no pasan al área de servicio de las femtoceldas 2 y 3 si no hay un ajuste de parámetros que lo fuerce.

#### 3.4.1.5. Experimento A3: Reparto de tráfico en edificio - combinación de técnicas

El tercer experimento pretende cuantificar el beneficio de las técnicas de reparto de tráfico en una situación extrema, pero realista. El escenario denominado escenario 3, mostrado en la Figura 3.13, es una generalización de los escenarios 1 y 2. El edificio considerado incluye 5 plantas con 4 femtoceldas por planta (es decir, 20 femtoceldas en total).

La distribución espacial de tráfico sigue una distribución en la que la planta central está sobrecargada, mientras que las plantas inferiores y superiores están infrautilizadas. De forma cuantitativa, en este escenario el 87 % de los usuarios comienzan su llamada en una de las oficinas de la planta central (oficina 9), el 12 % lo hace en el resto de oficinas de la planta central (oficinas 10-12), y el 1 % restante lo hace en el resto de plantas. Con esta distribución de tráfico y con la configuración de parámetros por defecto, la carga de las femtoceldas varía desde menos de un 1 % de utilización de PRB (femtoceldas de las plantas 1 y 5) hasta un 85 % (femtocelda 9 en la planta central). Esta situación puede considerarse como un caso peor, ya que la mayor parte del tráfico se genera en unas pocas femtoceldas,

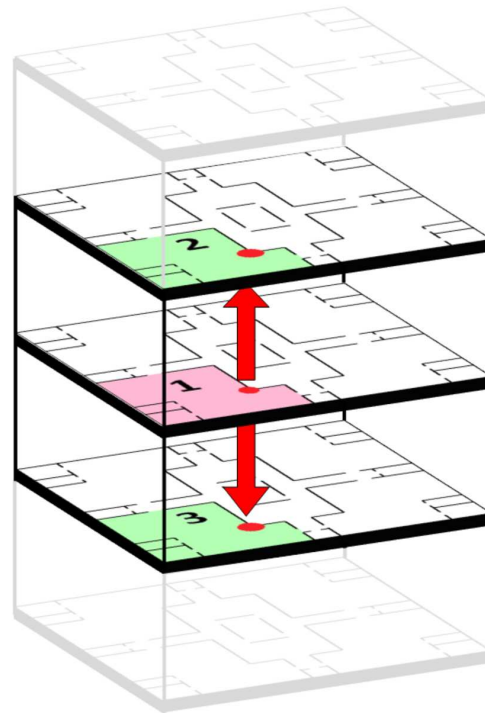


Figura 3.12: Esquema del escenario 2.

que son adyacentes entre sí. En estas condiciones, la capacidad para repartir tráfico es limitada, siendo la mejora del rendimiento inferior a la obtenida en una situación normal. En este escenario, se han probado diferentes combinaciones de MTSFC y PTS, que tratan de salvar las limitaciones de las técnicas cuando se utilizan de forma individual. Las diferentes combinaciones simuladas son:

1. **MTSFC antes de PTS (MTSFC-PTS).** En este caso, las técnicas se activan de forma consecutiva, tal como refleja la Figura 3.14. Durante los primeros 25 lazos, se habilita el controlador de MTSFC, para después activar PTS durante los siguientes 25 lazos. Es esperable que MTSFC alcance la situación de equilibrio en los 25 primeros lazos y, por tanto, se puede comprobar el efecto de MTSFC en el escenario 3 observando estos primeros 25 lazos. Analizando los siguientes 25 lazos, se pueden analizar las mejoras conseguidas por PTS. Nótese que en esta combinación PTS se habilita cuando los márgenes de traspaso ya no están en sus valores por defecto.
2. **PTS antes de MTSFC (PTS-MTSFC).** Como en el caso anterior, las técnicas se activan una tras la otra, pero en distinto orden. Tal como se observa en la Figura 3.14, PTS se activa durante los primeros 25 lazos y MTSFC durante los últimos 25. Por tanto, el efecto de PTS en el escenario 3 puede evaluarse analizando la primera parte de esta simulación, y la mejora introducida por MTSFC puede comprobarse observando la segunda mitad. En este caso, MTSFC se habilita una vez que las potencias de transmisión ya han sido modificadas.

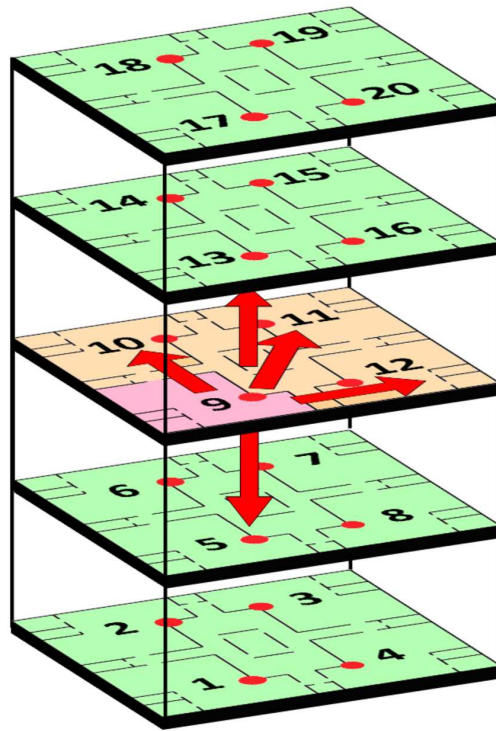


Figura 3.13: Esquema del escenario 3.

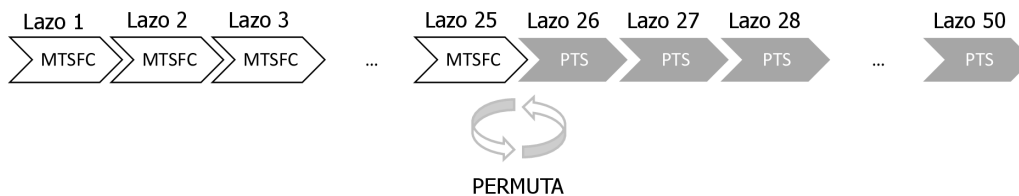


Figura 3.14: Funcionamiento de la estrategia MTSFC-PTS.

3. **MTSFC y PTS no coordinadas (MTSFC+PTS)**. En esta estrategia, MTSFC y PTS se ejecutan simultáneamente durante 50 lazos sin ningún tipo de coordinación, tal como se muestra en la Figura 3.16. Esta estrategia permite observar si existe algún problema o beneficio al ejecutar ambas técnicas en paralelo.
4. **MTSFC y PTS coordinadas (CTS)**. La estrategia CTS, descrita en la Figura 3.17, ejecuta MTSFC y PTS de forma simultánea y coordinada. Al contrario que MTSFC-PTS y PTS-MTSFC, en CTS la conmutación entre técnicas no se hace en un instante prefijado, sino que dicho instante se decide en tiempo real durante la ejecución de los algoritmos. En cada femtocelda, se activa en primer lugar MTSFC, y la conmutación a PTS se produce cuando MTSFC no puede mejorar más el rendimiento de esa femtocelda y sus vecinas. Tal como ya se explicó, en CTS, PTS se habilita en la femtocelda

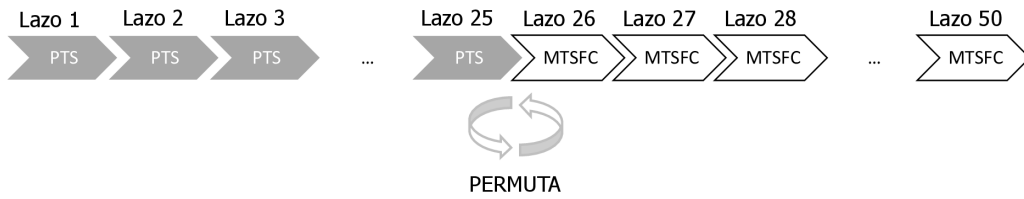


Figura 3.15: Funcionamiento de la estrategia PTS-MTSFC.

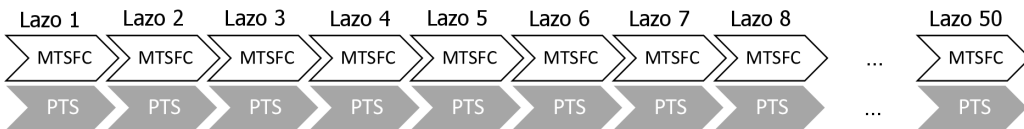


Figura 3.16: Funcionamiento de la estrategia MTSFC+PTS

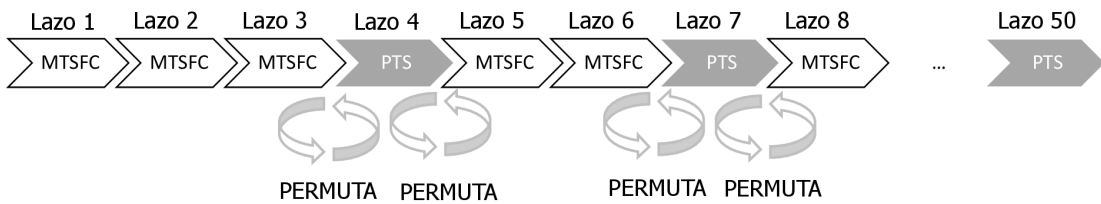


Figura 3.17: Funcionamiento de la estrategia CTS.

*i* cuando en todas sus adyacencias, o bien MTSC ha alcanzado sus límites (porque los márgenes han alcanzado su valor máximo o mínimo), o bien se ha alcanzado el equilibrio de la tasa de bloqueo.

### 3.4.1.6. Experimento A4: Reparto de tráfico en edificio - freno adaptativo

Este experimento pretende comparar las dos variantes del algoritmo MTS, que restringen los cambios de márgenes de manera fija (MTSFC) o adaptativa en función de estadísticas de la calidad de los traspasos por adyacencia (MTSAC). El escenario utilizado es el de experimentos anteriores, con la misma posición de las femtoceldas que el escenario 3 (Fig. 3.13). Sobre este escenario, se han simulado 25 lazos de optimización con la técnica MTSFC y 25 lazos de optimización con la técnica MTSAC.

En MTSAC, el valor de la *SINR* media previa al traspaso a partir del cual se frena el ajuste de los márgenes es  $\overline{SINR}_{HOmin} = -4$  dB. Se entiende que si la media de *SINR* anterior al traspaso en una adyacencia alcanza ese valor, el riesgo



de que un usuario alcance un valor de  $SINR$  inferior a  $-6.9$  dB (valor mínimo para que el usuario obtenga recursos) es demasiado alto y, por tanto, es recomendable no forzar más los márgenes de esa adyacencia.

Para apreciar mejor los problemas de calidad, en estas simulaciones se desactiva el mecanismo de traspaso por calidad ( $QualHO$ ), descrito en el Anexo A. Este tipo de traspaso, incluido por algunos fabricantes de estaciones base, se dispara cuando el nivel de  $SINR$  de un usuario está por debajo de un cierto umbral ( $-3$  dB en el resto de experimentos) y además existe una celda destino cuyo nivel de señal supera al de la celda servidora en un cierto margen,  $HOM_{QUAL}$ .

El mecanismo de traspaso por calidad se comporta como un freno del reparto de tráfico, devolviendo a la celda sobrecargada aquellos usuarios que experimentan mala calidad poco después de ser desplazados hacia las celdas vecinas. Como contrapartida, con los traspasos por calidad se incrementa significativamente el número de traspasos (y, con ello, la carga de señalización) cuando se realiza reparto de tráfico. Es precisamente la necesidad de reducir esa carga de señalización cuando los márgenes de traspaso se desplazan en exceso lo que justifica la necesidad de los frenos propuestos en esta tesis.

#### 3.4.1.7. Experimento A5: Reparto de tráfico en edificio - posición de femtoceldas

En este último experimento se pretende demostrar la robustez de las técnicas de reparto de tráfico frente a cambios en la disposición de las femtoceldas. Con este objetivo, se crean 10 escenarios en los que, a diferencia de los tres escenarios anteriores, la posición de las femtoceldas es aleatoria, sin ningún tipo de simetría. La única restricción en la posición de las femtoceldas es que exista al menos una femtocelda en el interior de cada oficina. Con ello, se quiere demostrar que las técnicas de reparto de tráfico presentadas obtienen resultados positivos bajo diferentes condiciones de despliegue.

Para crear los diferentes escenarios se parte del escenario del edificio completo con las femtoceldas ubicadas de forma simétrica (escenario 3). Para generar la posición de cada femtocelda en el nuevo escenario, se aplica un desplazamiento aleatorio a cada una de ellas respecto a su posición en el escenario 3, imponiendo la restricción de que la posición resultante esté en la misma oficina.

La Figura 3.18 representa, a modo de ejemplo, el esquema de posicionamiento de femtoceldas en uno de los 10 escenarios. En esta figura se representa la disposición de las femtoceldas en las 5 plantas del edificio, superponiéndolas en un plano de planta. Los rombos representan la posición de las 4 femtoceldas de la planta central, las espas y las cruces representan la posición de las femtoceldas de las plantas 2 y 4, y por último, los triángulos y los cuadrados representan la posición de las femtoceldas en las plantas 1 y 5. También se añade la posición de las femtoceldas en el escenario de referencia (escenario 3), que es la misma para todas las plantas (círculos).

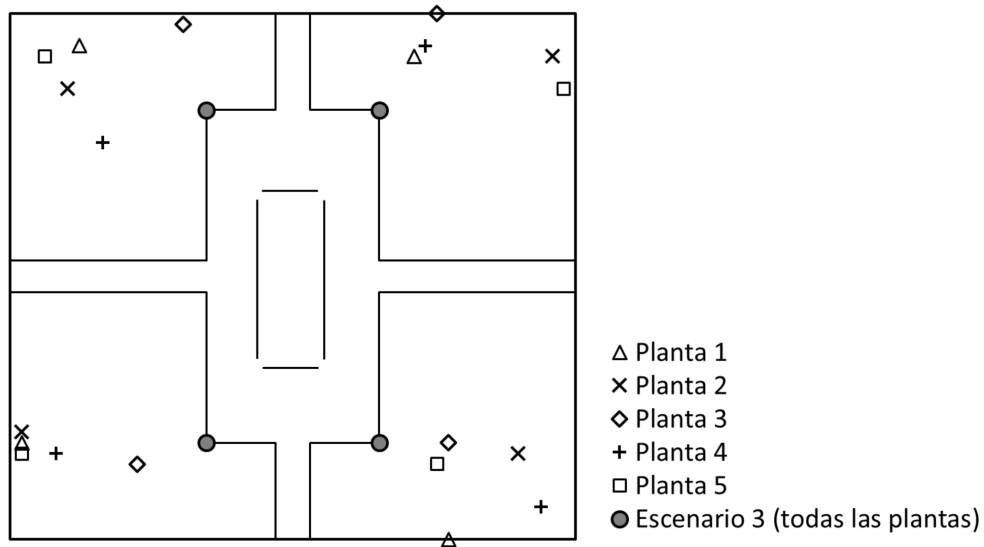


Figura 3.18: Ejemplo de escenario con posicionamiento de femtoceldas irregular.

Sobre cada uno de los 10 escenarios irregulares, se repiten las simulaciones realizadas en los experimentos A1, A2 y A3, que son: a) esquemas MTS, MTSFC y PTS activando solo las femtoceldas de la planta 3, b) esquema PTS activando únicamente una femtocelda en las plantas 2, 3 y 4 (MTSFC no se simula, ya que, como se verá más adelante, no es capaz de repartir tráfico en el escenario 1), y c) esquemas combinadas (MTSFC-PTS, PTS-MTSFC, MTSFC+PTS y CTS) activando todas las femtoceldas del escenario. Las distribuciones de tráfico utilizadas en cada una de las simulaciones son las mismas utilizadas en los experimentos A1, A2 y A3.

Como puede comprobarse, este último experimento requiere una campaña de simulaciones muy extensa en comparación con los experimentos anteriores. Mientras que el objetivo de los primeros experimentos es realizar un análisis minucioso de cada uno de los algoritmos de optimización, en este último experimento se pretende comprobar si las conclusiones extraídas se pueden generalizar a cualquier tipo de escenario.

### 3.4.1.8. Indicadores de rendimiento

Desde el punto de vista del usuario, los principales indicadores para valorar las técnicas de reparto de tráfico son: a) como medida de la capacidad de la red, la tasa global de llamadas bloqueadas,  $BR$ , definida como

$$BR = \frac{\sum_i N_{u.b.}(i)}{\sum_i N_{u.}(i)}, \quad (3.11)$$

donde  $N_{u.}(i)$  y  $N_{u.b.}(i)$  son el número total de llamadas ofrecidas y bloqueadas por falta de recursos en la femtocelda  $i$ , y b) como medida de la calidad global de conexión, la tasa global de interrupción de conexión,  $OR$  (*Outage Ratio*), definida como el ratio del tiempo de conexión en el que el usuario no es servido adecuadamente. Este último ratio se calcula como la suma de dos componentes:

$$OR = OR_r + OR_c, \quad (3.12)$$

donde  $OR_r$  es el ratio global de pérdida de conexión por falta temporal de recursos y  $OR_c$  es el ratio global de pérdida de conexión por baja calidad de señal. Estas componentes se calculan mediante las expresiones:

$$OR_r = \frac{\sum_i \sum_u t_{SinRecursos}(u, i)}{\sum_i \sum_u t_{total}(u, i)}, \quad (3.13)$$

y

$$OR_c = \frac{\sum_i \sum_u t_{MalaCalidad}(u, i)}{\sum_i \sum_u t_{total}(u, i)}, \quad (3.14)$$

donde  $t_{SinRecursos}(u, i)$  es el tiempo que el usuario  $u$  no puede transmitir en la femtocelda  $i$  por falta de recursos,  $t_{MalaCalidad}(u, i)$  es el tiempo que el usuario  $u$  no puede transmitir en la femtocelda  $i$  por baja calidad (es decir,  $SINR < -6.9$  dB) y  $t_{total}(u, i)$  es el tiempo total que el usuario  $u$  ha permanecido activo en la femtocelda  $i$ .

Para facilitar la comparación de métodos, los indicadores  $BR$  y  $OR$  se agregan en una única cifra de mérito, nombrada como tasa de usuarios insatisfechos,  $UUR$  (*Unsatisfied User Ratio*), calculada como

$$UUR = BR + OR(1 - BR). \quad (3.15)$$

Desde el punto de vista del operador, una medida interesante es la carga de señalización existente en la red, que puede estimarse a partir de la tasa de trasposos,  $HOR$  (*Handover Ratio*), definida como el número de trasposos por llamada cursada:

$$HOR = \frac{\sum_i HO(i)}{\sum_i N_{u.c.}(i)}, \quad (3.16)$$

donde  $HO(i)$  es el número de trasposos realizados con éxito desde la femtocelda  $i$  hacia una femtocelda vecina y  $N_{u.c.}(i)$  es el número total de llamadas iniciadas con éxito en la femtocelda  $i$ .

Para el operador, también es interesante conocer el grado de intervención del proceso de optimización sobre la configuración de red. Dicho grado de intervención viene determinado por la magnitud de los cambios efectuados respecto a la configuración por defecto tras finalizar el proceso de optimización. En este trabajo, la magnitud del cambio tras un lazo de optimización viene dada por la desviación media de los márgenes de traspaso con respecto a su valor inicial, calculada como

$$\overline{Dev}_{HOM}^{(n)} = \frac{\sum_i \sum_j |HOM^{(n)}(i, j) - HOM^{(0)}(i, j)|}{N_{ady}}, \quad (3.17)$$

donde  $HOM^{(n)}(i, j)$  es el margen de traspaso de  $i$  a  $j$  en el lazo  $n$ ,  $HOM^{(0)}(i, j)$  es el margen de traspaso desde la femtocelda  $i$  a la femtocelda  $j$  por defecto y  $N_{ady}$  es el número total de adyacencias definidas en la red. De la misma forma, la desviación media de la  $P_{TX}$  con respecto a su valor inicial se calcula como

$$\overline{Dev}_{PTX}^{(n)} = \frac{\sum_i P_{TX}^{(n)}(i) - P_{TX}^{(0)}(i)}{N_c}, \quad (3.18)$$

donde  $P_{TX}^{(n)}(i)$  es la potencia de transmisión de la femtocelda  $i$  en el lazo  $n$ ,  $P_{TX}^{(0)}(i)$  es la potencia de transmisión por defecto de la femtocelda  $i$  y  $N_c$  es el número total de femtoceldas en la red. En este caso, se ha eliminado el operador de valor absoluto para mantener el signo del cambio de parámetros, ya que es el decremento de la potencia respecto al valor por defecto lo que puede causar problemas de cobertura.

Los algoritmos de ajuste automático propuestos modifican los parámetros de red de forma progresiva. Esta progresión puede verse como una trayectoria, que, partiendo de una situación inicial, discurre por estados intermedios hasta finalizar en una situación de equilibrio. A priori, el análisis se centra en el comportamiento asintótico de esta trayectoria, caracterizada por el valor de  $UUR_{(n)}$  cuando  $n \rightarrow \infty$ . Sin embargo, es fácil entender que de nada sirve mejorar el rendimiento de la red en régimen permanente si, durante el proceso de optimización, se alcanzan situaciones transitorias inaceptables. Por este motivo, para comparar las técnicas de reparto entre sí, es preciso evaluar toda la trayectoria del proceso de optimización, y no solo el comportamiento en régimen permanente. Para evaluar la respuesta transitoria con un único indicador, en este trabajo se utiliza un modelo de descuento de

horizonte infinito [59]. En este modelo, el coste de una trayectoria,  $P$ , se calcula como

$$P = (1 - \gamma) \sum_{n=0}^{\infty} \gamma^n \overline{UUR^{(n)}}, \quad (3.19)$$

es decir, la media ponderada del coste de cada configuración de red por separado,  $UUR$ , a lo largo de los lazos. Este modelo tiene en cuenta los valores de  $UUR$  a muy largo plazo, pero reduce su peso de acuerdo a una ley geométrica con factor de descuento  $\gamma$ , donde  $0 \leq \gamma \leq 1$ . Esta fórmula pretende reflejar cómo, en la práctica, los operadores prefieren una mejora menor inmediata frente a una mejora mayor futura, ya que las condiciones de tráfico pueden cambiar antes de que el proceso de autoajuste se estabilice, haciendo inútiles las modificaciones llevadas a cabo. Estrictamente, debería simularse un número infinito de lazos. Para reducir la carga computacional, se asume que se alcanza la situación de equilibrio tras  $h$  lazos de optimización. Por tanto, el coste total puede calcularse como

$$P = (1-\gamma) \sum_{n=0}^{h-1} \gamma^n \cdot \overline{UUR^{(n)}} + \sum_{n=h}^{\infty} \gamma^n \cdot \overline{UUR^{(n)}} \approx (1-\gamma) \sum_{n=0}^{h-1} \gamma^n \cdot \overline{UUR^{(n)}} + \gamma^h \cdot \overline{UUR^{(h)}}, \quad (3.20)$$

donde  $UUR^{(h)}$  es el valor del indicador de rendimiento en el último lazo simulado. En este trabajo, se simulan 25 lazos (es decir, 1 lazo inicial + 24 pasos de ajuste). Este número de lazos es lo suficientemente grande para que los métodos alcancen un punto de equilibrio, e incluso si este no fuese el caso, el bajo valor de  $\gamma^n$  asegura que la influencia de los lazos más allá del último lazo simulado sea despreciable.

### 3.4.2. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los experimentos. En la descripción de los resultados de los experimentos A1 y A2 se realiza un análisis minucioso de cómo el ajuste de parámetros modifica las áreas de servicio de las femtoceldas, y cuál es el impacto de estos cambios sobre el rendimiento de la red. Por brevedad, la descripción de los resultados del experimento A3 y A4 se centra sólo en la comparación del rendimiento de las diferentes combinaciones de técnicas de reparto de tráfico. Por último, el análisis de resultados del experimento A5 se centra en la variabilidad del rendimiento de las técnicas de reparto de tráfico con diferentes escenarios de despliegue.

#### 3.4.2.1. Experimento A1: Reparto de tráfico en una misma planta

Antes de simular las técnicas de reparto de tráfico, se realiza un análisis preliminar para comprobar el impacto de la variación de los parámetros en el área

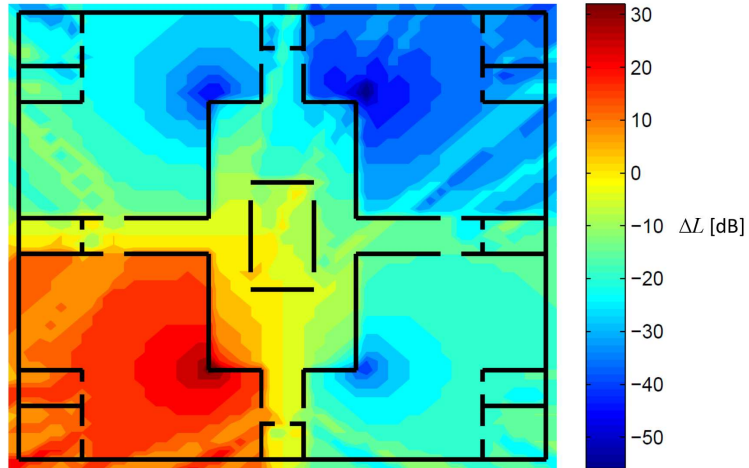


Figura 3.19: Diferencia de pérdidas entre las femtoceldas del escenario 1.

de dominancia de las femtoceldas. Con este propósito, se define la diferencia de pérdidas de propagación entre una femtocelda y su vecina más próxima en un punto del escenario como

$$\Delta L(x, i) = \min_j (L(x, j) - L(x, i)) \quad \forall j \neq i \quad , \quad (3.21)$$

donde  $L(x, i)$  son las pérdidas de propagación de la estación base  $i$  en la posición  $x$  expresadas en dB. El operador  $\min$  asegura que  $\Delta L(x, i)$  muestra siempre la diferencia con la vecina más cercana en esa posición  $x$ . La Figura 3.19 muestra esta diferencia de pérdidas para la femtocelda 1 (es decir,  $\Delta L(x, 1)$ ) en el escenario 1. En la figura, la femtocelda 1 está situada en la zona inferior izquierda. Las curvas de nivel están separadas 4 dB. Un valor positivo indica que los usuarios en esa posición serían servidos por la femtocelda 1 si los parámetros están configurados a su valor por defecto (es decir, máxima potencia de transmisión y márgenes de traspaso positivos).

Asimismo,  $\Delta L$  cuantifica la desviación que deben sufrir los márgenes o la potencia de transmisión para enviar o recibir usuarios de otras femtoceldas que no se desplazan. En la figura, se observa, por ejemplo, que la mayoría de los usuarios en los pasillos podrían ser reasignados a la femtocelda 1 forzando que  $P_{TX}(j) - P_{TX}(1) - HOM(1, j) \leq -12dB$ , lo que puede conseguirse desplazando los márgenes a 12 dB o reduciendo la potencia de transmisión de las femtoceldas vecinas 12 dB. De la misma forma, la mitad de los usuarios en la femtocelda 1 podrían ser enviados a femtoceldas vecinas forzando que  $P_{TX}(j) - P_{TX}(1) - HOM(1, j) \geq 12dB$ .

Por el contrario, para enviar a otras femtoceldas a los usuarios de la parte superior derecha de la oficina 1, sería necesario hacer cambios demasiado grandes en los márgenes de traspaso o en las potencias de transmisión. También puede deducirse de la figura que es complicado realizar un reparto de tráfico suave ajustando los

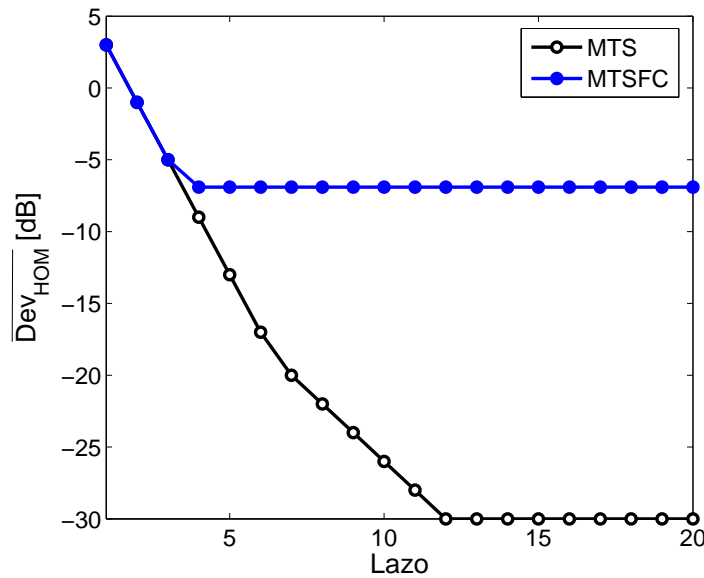


Figura 3.20: Desviación media de los márgenes de traspaso desde la femtocelda 1 para MTS y MTSFC en el escenario 1.

márgenes, ya que, debido a la pequeña diferencia de pérdidas de propagación dentro de una misma estancia, una vez que las pérdidas introducidas por un muro se superan, todos los usuarios en esa habitación (no solo algunos de ellos, como sería deseable) se traspasan a otra femtocelda. Esta falta de progresividad puede dar lugar a problemas de inestabilidad si el proceso de ajuste no se lleva a cabo de forma gradual.

Tras el análisis previo, se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones. En este escenario de una sola planta, MTS disminuye los márgenes de traspaso de la femtocelda 1 para enviar usuarios a las femtoceldas 2, 3 y 5. La Figura 3.20 muestra la evolución de la media de los márgenes de traspaso desde la femtocelda 1 a sus vecinas (es decir,  $\overline{HOM(1,j)}$ ) durante los 20 lazos de la simulación. Se observa que, partiendo de la configuración de margen por defecto (3 dB), el controlador MTS disminuye progresivamente los márgenes de traspaso salientes en la femtocelda 1 para equilibrar las tasas de bloqueo en la planta. Cuanto más negativos son los márgenes de traspaso, mayor parte del área de servicio de la femtocelda 1 se reconvierte en área de servicio de otras femtoceldas. En este caso particular, el reparto de tráfico se lleva a cabo enviando los usuarios del pasillo y alrededores de la femtocelda 1 a las otras femtoceldas, como puede deducirse del análisis de la Figura 3.19.

Como consecuencia del reparto de tráfico, la tasa global de bloqueo de llamadas del escenario se reduce. La Figura 3.21 muestra la evolución de  $UUR$  durante los 20 lazos de simulación. Por claridad, el indicador de  $UUR$  se desglosa en sus componentes  $BR$ ,  $OR_r$  y  $OR_c$ .

En la parte izquierda de la figura, se aprecia que en la situación inicial,  $UUR$  es

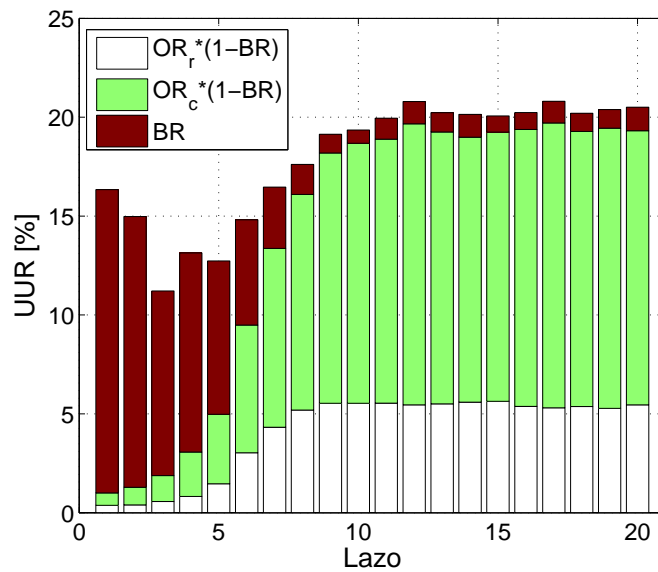


Figura 3.21: Evolución de la tasa de usuarios insatisfechos para MTS en el escenario 1.

16 %, debido principalmente a que  $BR$  es 15 %. Estos valores justifican la necesidad de repartir tráfico. En los 3 primeros lazos, el valor de  $UUR$  disminuye bruscamente, hasta un 12 %, gracias al alivio de congestión en la femtocelda 1. Comparando las Figuras 3.20 y 3.21, se concluye que MTS necesita cambiar los márgenes de traspaso en 8 dB (de 3 dB a -5 dB) para disminuir  $UUR$  del 16 % al 12 % en los tres primeros lazos. Un análisis más detallado de la Figura 3.19 refleja que el alivio de congestión experimentado se debe al envío de los usuarios del pasillo próximo a la femtocelda 1 a las femtoceldas 2 y 4.

Llegado este punto, como aún no se ha alcanzado la condición de equilibrio (la equalización de la tasa de bloqueo entre femtoceldas vecinas), MTS continúa disminuyendo los márgenes intentando enviar más usuarios de la femtocelda 1 al resto de femtoceldas. Esto provoca que los márgenes se hagan muy negativos (es decir, por debajo de -6.9 dB). En esta situación, los usuarios que están cerca de la femtocelda congestionada en la oficina 1 son enviados a las femtoceldas vecinas, donde experimentan un alto nivel de interferencia procedente de la que era su femtocelda original. Así,  $OR_c$  comienza a incrementarse significativamente y, como consecuencia, aunque MTS sigue disminuyendo  $BR$ ,  $UUR$  termina siendo peor que en la situación inicial (concretamente, un 20 %). No se muestra en la figura el hecho de que el  $HOR$  se incrementa de 1 a 13 (es decir, de 1 a 13 traspasos por llamada). Este valor refleja claramente que, cuando los márgenes se hacen excesivamente bajos, se produce una inestabilidad del proceso de traspaso, conocida como efecto ping-pong, donde los usuarios realizan traspasos de ida y vuelta en un corto intervalo de tiempo. Este efecto puede evitarse forzando a que los márgenes se mantengan siempre por encima de -6.9 dB, lo que justifica la limitación de los márgenes de traspaso (que es la única diferencia entre MTS y MTSFC).



Téngase en cuenta que, debido a que las variaciones de los márgenes se realizan de forma simétrica en los dos sentidos de la adyacencia, una limitación inferior de los márgenes de traspaso de  $-6.9$  dB implica una limitación superior de  $12.9$  dB. Obviamente, MTS y MTSFC tienen exactamente los mismos valores de los márgenes de traspaso mientras éstos se mantengan dentro del intervalo permitido (es decir,  $[-6.9, 12.9]$  dB) y, por tanto, su rendimiento en los tres primeros lazos es el mismo.

Por supuesto, toda restricción en el proceso de ajuste limita la capacidad de repartir tráfico. No obstante, en los 3 primeros lazos, cuando MTS aún no había superado los límites, el valor de  $UUR$  ya se había reducido en un 4 % en términos absolutos en comparación con su situación inicial. Este resultado demuestra que el alivio de congestión es grande aunque se incluya la restricción del margen. Con ello, queda demostrada la utilidad de la técnica MTSFC.

Para cerrar el análisis de la técnica MTS en este escenario de 1 planta, se analiza en detalle la evolución del número de usuarios servidos por cada una de las femtoceldas a lo largo del proceso de optimización. Como consideración de partida, se debe tener en cuenta que, con la distribución espacial de tráfico de este escenario, todos los usuarios se crean en la oficina 1, pero sus movimientos no están restringidos a ésta, sino a toda la planta. En el simulador, no se modelan los usuarios en modo ocioso (sin conexión activa), por lo que todas las conexiones comenzarán en la oficina 1. Así, el desplazamiento de un usuario hacia otra oficina solo se produce durante el curso de la conexión. En consecuencia, aunque todos los usuarios inician sus llamadas en la oficina 1, hay un pequeño porcentaje que la finaliza en una oficina distinta. Como resultado, se produce un efecto de reparto de tráfico que, no obstante, es muy limitado. Cabe resaltar que, debido a que la duración media de una conexión ( $100$  s) es mucho menor que la de un lazo de optimización ( $3600$  s), este porcentaje de usuarios en una oficina distinta a la 1 es constante durante todo el proceso de optimización, ya que este efecto de dispersión de los usuarios no se acumula a lo largo del tiempo. Por tanto, las mejoras en los indicadores de rendimiento que se aprecian entre los distintos lazos de optimización, son debidas exclusivamente a los cambios realizados en los parámetros de la red (es decir,  $HOM$  y  $P_{TX}$ ).

En la Figura 3.22 se muestra la evolución de la localización de los usuarios (oficina en la que se encuentran) y la femtocelda a la que son asignados para la técnica MTSFC. Por simplificar, en la figura se han agrupado las femtoceldas/oficinas 2, 3 y 4 por un lado, y la femtocelda/oficina 1 por el otro. Puede observarse cómo el número de usuarios en cada oficina permanece constante a lo largo de los diferentes lazos de optimización, dado que las condiciones de generación de la llamada y movilidad de usuario no cambian entre lazos de optimización. Asimismo, se observa que el porcentaje de usuarios en las oficinas 2, 3 y 4 (usuarios que se han desplazado a otra oficina durante su conexión) es pequeño. Es en la asignación de estos usuarios a las femtoceldas donde se aprecia el efecto del reparto de tráfico llevado a cabo por la técnica MTSFC. Así, si al comienzo del proceso de optimización el 70 % de los usuarios eran asignados a la femtocelda 1, al final del proceso, únicamente permanece asignados a ésta un 60 %, lo que se traduce en un alivio de la

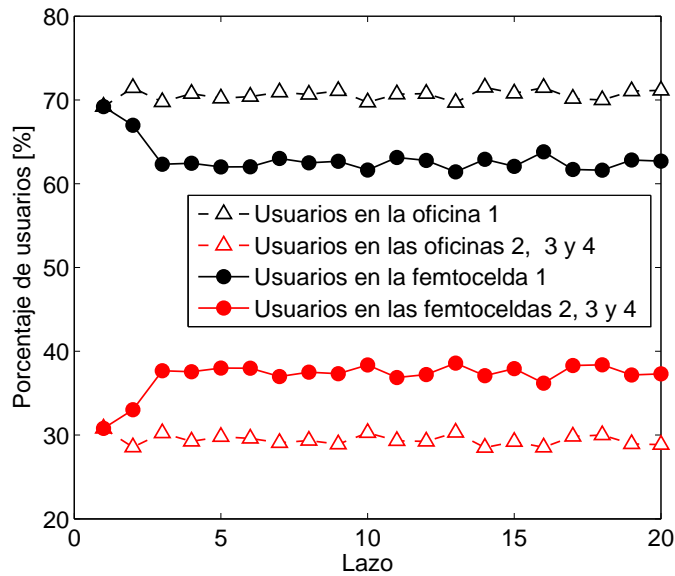


Figura 3.22: Evolución de la ubicación y asignación a femtoceldas de usuarios con MTS-FC en el escenario 1.

congestión.

PTS muestra un comportamiento similar a MTS en el escenario 1. La Figura 3.23 presenta la desviación de la potencia de transmisión de cada femtocelda respecto al valor máximo configurado por defecto (Ecuación 3.9). La Figura 3.24 muestra el valor de  $UUR$  obtenido con la técnica PTS. Se observa que, en los primeros 5 lazos, la potencia de la femtocelda 1 disminuye 10 dB, lo que causa que menos usuarios se conecten a dicha femtocelda. Esto se traduce directamente en una reducción de  $UUR$  de 16 a 12%. En los siguientes 5 lazos (lazos 6 al 10), la femtocelda 1 trata de enviar más usuarios al resto de femtoceldas. Como consecuencia,  $OR$  se incrementa hasta un 9%, mientras que el valor de  $UUR$  se mantiene al mismo nivel. Básicamente, enviando usuarios desde la femtocelda 1 al resto,  $BR$  disminuye, pero  $OR$  se incrementa. Un análisis detallado muestra que, a partir del lazo 10, la femtocelda 2 y la femtocelda 4 comienzan a experimentar bloqueo y, por tanto, empiezan a disminuir su potencia de transmisión intentando enviar usuarios a la femtocelda 3, que es la más lejana a la 1. En contraste a lo que ocurre con MTS, en PTS no existe la necesidad de limitar la potencia de transmisión, ya que el valor de  $UUR$  no se degrada cuando las desviaciones de potencia son demasiado grandes. Por el mismo motivo, no aparece efecto ping-pong, ya que los cambios en la potencia de transmisión propician que los usuarios comiencen sus llamadas en la femtocelda de la que reciben un nivel de señal más alto, lo que hace que no sea necesario llevar a cabo traspasos para repartir tráfico.

En la Figura 3.25, se muestra la evolución de la ubicación y asignación a femtoceldas de usuarios para la técnica PTS. Se aprecia de nuevo cómo, mientras que la distribución espacial de los usuarios no varía entre los lazos de optimización, el porcentaje de usuarios asignados a la femtocelda 1 disminuye de un 70% a menos

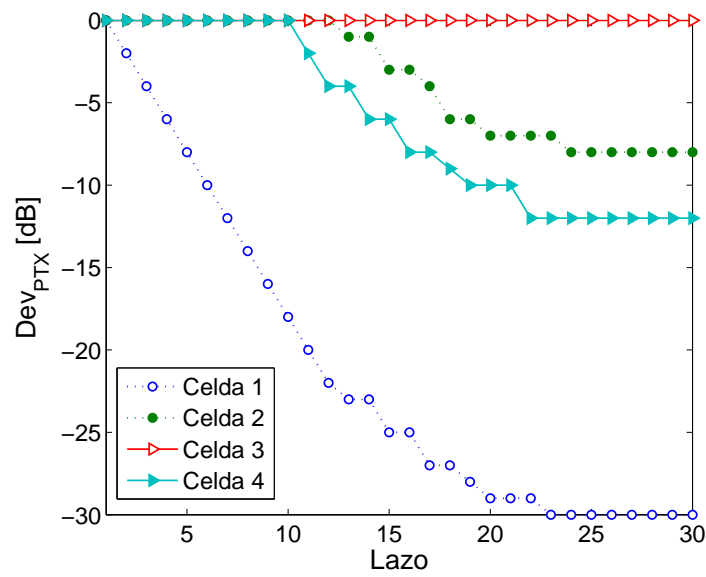


Figura 3.23: Desviación de la potencia de las femtoceldas para PTS en el escenario 1.

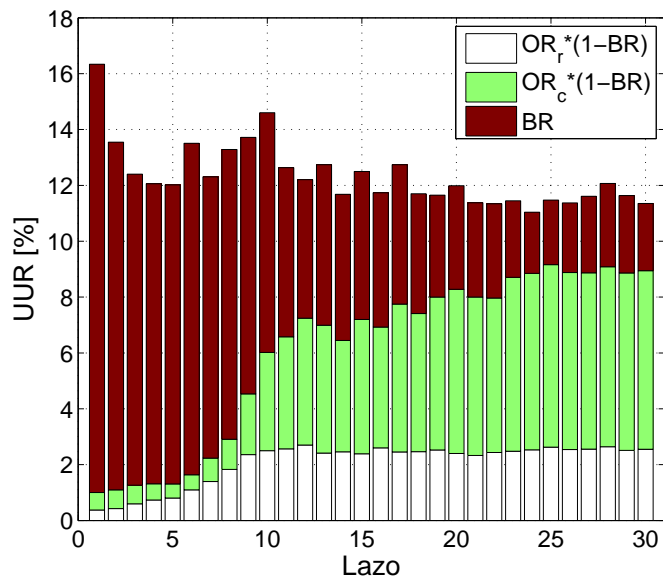


Figura 3.24: Evolución de la tasa de usuarios insatisfechos para PTS en el escenario 1.

de un 30%. Un análisis más exhaustivo muestra que esto se debe a que MTSC solo es capaz de enviar a otras femtoceldas los usuarios de los pasillos y las zonas comunes, mientras que PTS es capaz de enviar a otras femtoceldas usuarios dentro de la propia oficina. De esta manera, PTS consigue un mayor alivio de congestión.

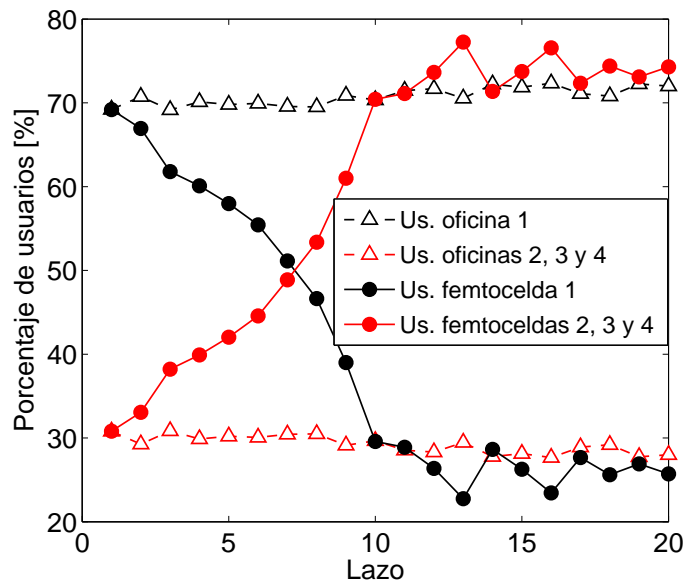


Figura 3.25: Evolución de la localización de los usuarios y su asignación a las femtoceldas para PTS en el escenario 1

### 3.4.2.2. Experimento A2: Reparto de tráfico entre diferentes plantas

El escenario 2 contiene tres femtoceldas en diferentes plantas. Las pérdidas de propagación que introduce el forjado entre las plantas son de 17 dB, mientras que las pérdidas introducidas por los muros convencionales son de 5 dB. Esta es la razón por la que las técnicas de reparto de tráfico en este escenario necesitan realizar cambios más grandes de los parámetros de red. Debido a las restricciones impuestas en la variación de los márgenes, MTSFC no es capaz de repartir tráfico con femtoceldas de otras plantas. Un estudio más exhaustivo muestra que los usuarios solo comienzan a ser enviados desde la femtocelda 1 a las femtoceldas 2 y 3, cuando los márgenes están ya por debajo de -17 dB, que es más allá de los límites de variación de márgenes en MTSFC. Para llegar a ese valor de  $HOM$ , las restricciones de MTSFC deben desactivarse (como en MTS), pero, en ese caso, el valor de  $UUR$  se degrada en lugar de mejorar.

Por el contrario, PTS sí es capaz de superar las pérdidas introducidas por el forjado para repartir tráfico. En la Figura 3.26 se ilustra la evolución del valor de  $UUR$  con PTS en este escenario. Se puede observar que, durante los primeros 5 lazos, el rendimiento de la red permanece constante, a pesar de que  $\Delta P_{TX}(1)$  se modifica en ese intervalo. En esos 5 primeros lazos, la disminución de potencia llevada a cabo en la femtocelda 1 no es suficiente para compensar la atenuación del forjado. Recuérdese que, tal como se configuran las funciones de pertenencia de salida del controlador PTS en la Figura 3.9, el cambio máximo de potencia de transmisión por lazo es de 2 dB. Con ello, tras los 5 primeros lazos, la reducción de potencia acumulada es de 10 dB. A partir de este lazo, la disminución de potencia de la femtocelda 1 consigue enviar usuarios desde la planta central a las plantas

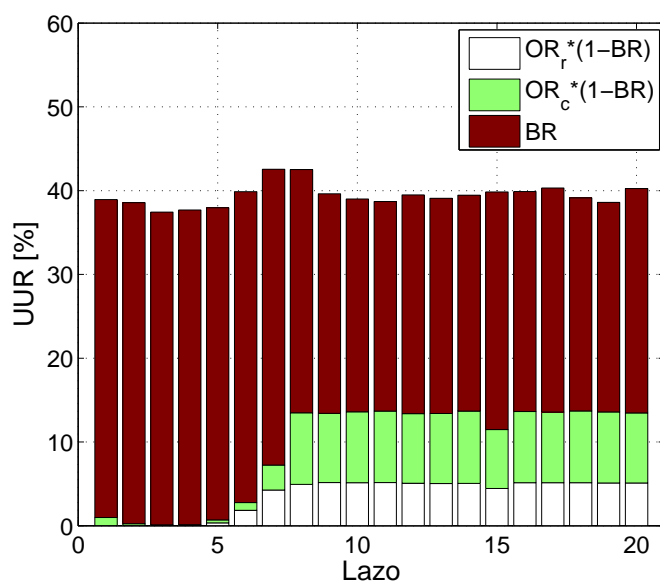


Figura 3.26: Evolución de la tasa de usuarios insatisfechos para PTS en el escenario 2.

superior e inferior, lo que se traduce en una mejora de  $BR$  del 39% al 36%. Sin embargo,  $OR$  se incrementa, en parte debido a la mala calidad de la conexión de los usuarios en la femtocelda 1. Como resultado,  $UUR$  se mantiene en los mismos valores que al inicio. Se puede concluir que PTS tampoco consigue una ganancia global en este escenario debido al excesivo aislamiento existente entre femtoceldas de diferentes plantas.

Debe aclararse que los valores de  $UUR$  mostrados en la Figura 3.26 son mucho mayores que los de la Figura 3.24 (40% frente a 16% para el lazo inicial). Esto es debido a que en el escenario 1 existen más femtoceldas en la planta por la que se desplazan los usuarios. Así, los usuarios, que se mueven dentro de toda la planta central, son servidos por todas las femtoceldas de esta planta, produciéndose un efecto de reparto de tráfico. En cambio, en el escenario 2, solo la femtocelda 1 está en la planta central por donde se desplazan los usuarios. En este caso, la femtocelda 1 debe servir a estos usuarios que, al moverse a otras oficinas donde el nivel de señal de la femtocelda 1 es más bajo, reducen su calidad de conexión y, por tanto, hacen un uso menos eficiente del espectro. Esto provoca que el valor de  $UUR$  en este escenario sea significativamente mayor al del escenario 1.

### 3.4.2.3. Experimento A3: Reparto de tráfico en edificio - combinación de técnicas

Los escenarios anteriores se han utilizado para comprobar las limitaciones de cada uno de los algoritmos cuando se emplean de forma individual. El escenario 3 es una generalización de los escenarios anteriores, que considera un edificio de 5 plantas con 4 femtoceldas por planta. En este escenario, el análisis se centra

en la combinación de técnicas. Para ello, se simulan las estrategias MTSFC-PTS, PTS-MTSFC, MTSFC+PTS y CTS.

Para comparar las diferentes estrategias, se analiza la evolución de los indicadores  $UUR$ ,  $BR$ ,  $OR$ ,  $HOR$  y  $\Delta P_{TX}$ . En la Figura 3.27 se muestra la evolución de  $UUR$ . Se puede observar que las diferentes combinaciones de técnicas disminuyen  $UUR$  de forma similar, que pasa del 17% con la configuración inicial al 8% en régimen permanente. En la Figura 3.28, se observa que esta disminución se consigue por la reducción de  $BR$  del 16% a valores inferiores al 1%. Como contrapartida, se incrementa  $OR$  desde el 1% al 8%, como puede verse en la Figura 3.29.

Comparando las estrategias combinadas con las técnicas individuales, MTSFC-PTS supera claramente a MTSFC. En concreto,  $UUR \approx 12\%$  para el paso  $n = 25$  antes de PTS, y  $UUR \approx 8\%$  para  $n = 50$  después de PTS. Sin embargo, PTS-MTSFC no consigue mejorar el resultado conseguido con la técnica PTS en los primeros 25 lazos. Los resultados conseguidos por las estrategias MTSFC+PTS y CTS son los mismos, con la diferencia de que éstas alcanzan el equilibrio de forma más rápida. Esto era lo esperado, ya que ambas técnicas modifican márgenes de traspaso y potencia de transmisión al mismo tiempo.

Todos los métodos consiguen repartir tráfico reasignando usuarios de las femtoceldas congestionadas a otras femtoceldas. Cuando esto se hace a través del proceso de traspaso (como en MTSFC), el número de traspasos aumenta significativamente, como puede observarse en la Figura 3.30, donde se presenta la evolución de la tasa de traspaso. Este incremento es especialmente grande cuando aparecen traspasos ping-pong generados por los usuarios que experimentan baja  $SINR$  en la femtocelda a la que han sido enviados. Este es el caso de MTSFC+PTS y CTS, donde el  $HOR$  se incrementa hasta alcanzar 6 veces su valor original. Por el contrario, en la primera etapa de MTSFC-PTS y PTS-MTSFC, el  $HOR$  se mantiene en valores bajos.

Todos los métodos tienen un comportamiento asintótico muy similar en sus indicadores, pero con trayectorias ligeramente distintas. Para comparar las trayectorias, la Tabla 3.4 muestra el valor de  $UUR$  mínimo,  $\min(UUR^{(n)})$ , el  $UUR$  final o de equilibrio,  $UUR^{(50)}$ , y el coste global (o promedio ponderado),  $P$ , de la trayectoria de cada una de las estrategias. Aunque todas ellas alcanzan una situación de equilibrio similar, como se aprecia en la cuarta columna de la Tabla 3.4, CTS y, especialmente MTSFC+PTS, alcanzan el punto de equilibrio antes que las demás. Esto se refleja en su valor de  $P$ , que es más bajo que para las estrategias con conmutación entre técnicas previamente fijada (MTSC-PTS y PTS-MTSC).

De los resultados presentados hasta el momento se podría concluir que MTSFC+PTS es la mejor estrategia, ya que presenta el menor valor de  $P$ , porque consigue el mejor valor de  $UUR$  más rápido. Sin embargo, si se tienen en cuenta las desviaciones de la potencia de transmisión de las femtoceldas respecto al valor original, la conclusión no es la misma.

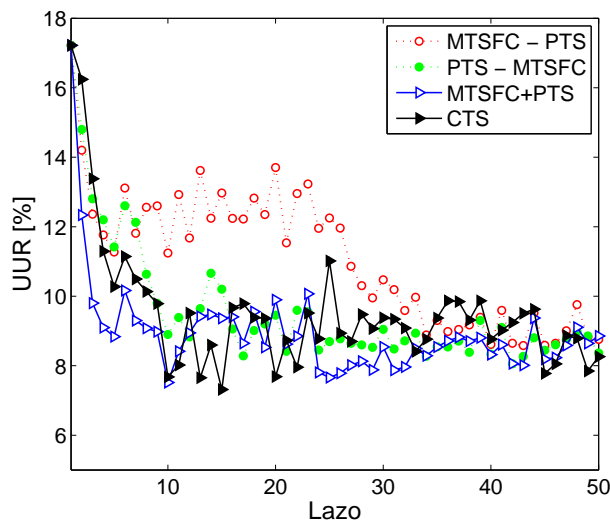


Figura 3.27: Evolución de la tasa de usuarios insatisfechos con diferentes técnicas en el escenario 3.

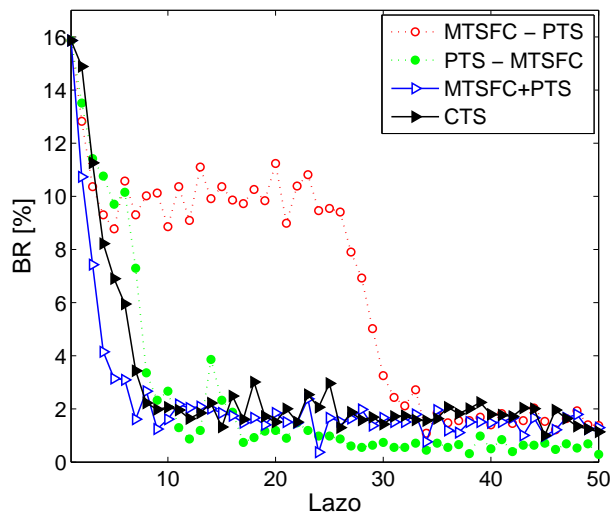


Figura 3.28: Evolución de la tasa de bloqueo de llamadas con diferentes técnicas en el escenario 3.

La Figura 3.31 muestra la evolución de la desviación media de potencia causada por cada una de las técnicas. En la figura, se observa que la técnica que menor desviación de potencia produce al final del proceso de optimización es CTS. Mientras que CTS produce una desviación media de  $-0.5$  dB, MTSFC+PTS causa una desviación de  $-0.7$  dB. Aunque estos valores medios pueden parecer poco significativos, en algunas femtoceldas concretas sí pueden llegar a ser importantes (en el caso simulado, hasta de  $-16$  dB). Un análisis pormenorizado celda a celda muestra que la máxima desviación de la potencia de transmisión en una femtocelda al final

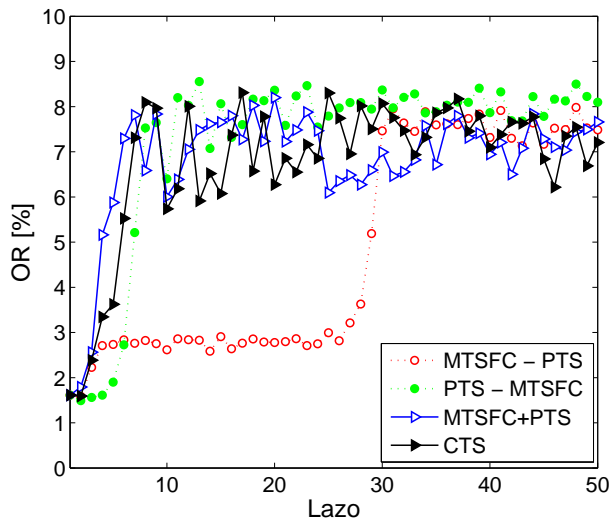


Figura 3.29: Evolución de la tasa de pérdida de conexión con diferentes técnicas en el escenario 3.

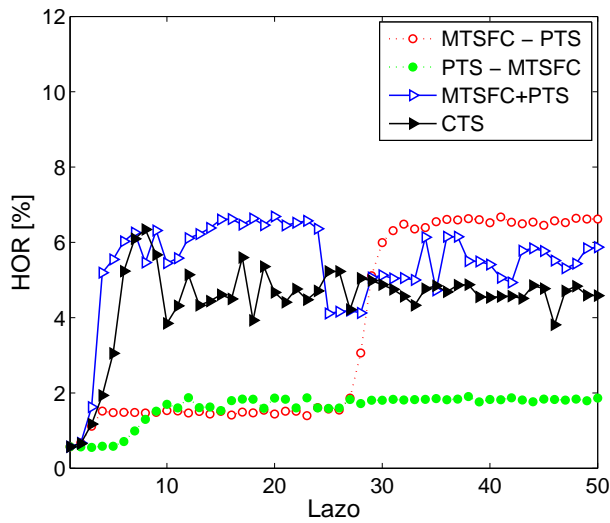


Figura 3.30: Evolución de la tasa de traspaso con diferentes técnicas en el escenario 3.

del proceso de ajuste (es decir,  $\max_i(\Delta P_{TX}^{(50)}(i))$ ) en MTSFC-PTS, PTS-MTSFC, MTSFC+PTS y CTS es de -10, -16, -11 y -9 dB, respectivamente. Por tanto, se confirma que CTS consigue minimizar los cambios de potencia en las femtoceldas, gracias a su mecanismo de conmutación inteligente entre técnicas, que solo activa PTS cuando MTSFC ha agotado sus posibilidades.

En el caso normal, donde las femtoceldas se configuran inicialmente a su máxima potencia, minimizar la magnitud de los cambios de potencia reduce el riesgo de crear huecos de cobertura, que aparecen frecuentemente en entornos de interior. Para cuantificar el impacto de los cambios de potencia en la cobertura, la Figu-



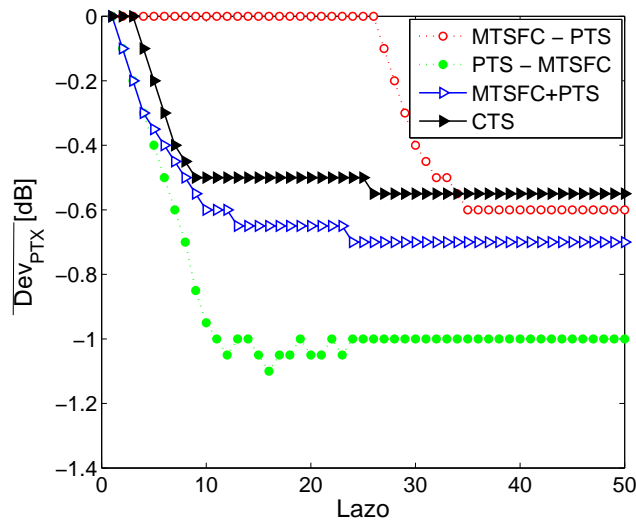


Figura 3.31: Evolución de la desviación media de potencia para diferentes técnicas en el escenario 3.

Tabla 3.4: Valores de coste de las técnicas combinadas.

Estrategia	$\min(UUR^{(n)})$	$UUR^{(50)}$	$P$
MTSFC-PTS	0.0858	0.0876	0.1187
PTS-MTSFC	0.0806	0.0836	0.1040
MTSFC+PTS	0.0752	0.0886	0.0947
CTS	0.0732	0.0826	0.1016

ra 3.32 muestra la función de distribución del nivel de señal recibida en el área de servicio de la femtocelda más cargada (que es la que más ha reducido su potencia) al final del proceso de optimización. En la figura puede verse cómo PTS-MTSFC y MTSFC+PTS reducen el nivel de señal recibida hasta en 10-12 dB respecto a la situación inicial (distancia horizontal en la figura), siendo el decremento 4-5 dB mayor que el producido por MTSFC-PTS y CTS.

En el presente escenario, las femtoceldas presentan un solapamiento muy alto, por lo que es muy probable que un decremento 4-5 dB mayor en el nivel de señal recibida no provoque huecos de cobertura. Sin embargo, en un escenario distinto, donde el solapamiento no sea tan alto y el nivel de señal sea más ajustado, tal reducción puede afectar de forma significativa a la cobertura. En estos casos, las técnicas que realizan un reparto de tráfico con un menor desplazamiento de  $P_{TX}$ , es decir MTSFC-PTS y CTS, presentan un mejor rendimiento.

A la luz de los resultados, se puede concluir que no hay una estrategia combinada que supere claramente al resto. Todas las técnicas alcanzan un valor similar de  $UUR$  al final del proceso de optimización. CTS y MTSFC+PTS presentan una mayor velocidad de convergencia, por lo que son las más indicadas cuando el proceso de ajuste debe realizarse en tiempo real (p.ej., para resolver picos de congestión

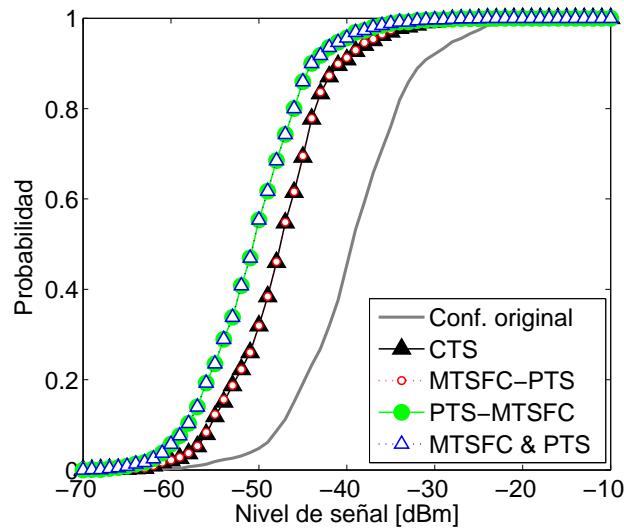


Figura 3.32: Función de distribución del nivel de señal recibida en la femtocelda más cargada al final del proceso de optimización en el escenario 3.

transitorios). Si se desea reducir el riesgo de crear huecos de cobertura, CTS es la mejor estrategia, ya que consigue el reparto de tráfico con una desviación de potencia menor. Si variar la potencia de transmisión no es un problema, entonces PTS-MTSFC es la mejor opción, ya que el valor de  $HOR$  es menos de la mitad que el obtenido con CTS. No obstante, debe tenerse en cuenta que el  $HOR$  se puede reducir por otros medios (p.ej., ajustando los parámetros de reelección de celda [32]).

#### 3.4.2.4. Experimento A4: Reparto de tráfico en edificio - freno adaptativo

En este experimento se comparan las dos variantes de MTS que introducen un freno al ajuste de márgenes, MTSFC y MTSAC. La Figura 3.33 muestra la evolución del valor de  $UUR$  para MTSFC y MTSAC en el escenario 3 (Fig. 3.13). Puede apreciarse que ambas técnicas presentan una evolución muy parecida. En ambos casos,  $UUR$  baja significativamente en los 4 primeros lazos. A partir de ahí se alcanza una situación estable que se mantiene durante el resto de simulación, y durante la cual  $UUR$  oscila alrededor del 10%.

Un estudio más exhaustivo muestra que ambas técnicas consiguen un rendimiento similar con configuraciones de márgenes muy diferentes. En la Figura 3.34 se representa la evolución del  $HOM$  entre la femtocelda más cargada (femtocelda 9) y sus femtoceldas más próximas (femtoceldas 5, 10, 11, 12 y 13) para MTSFC y MTSAC. Con MTSFC, todos los márgenes toman el valor de -6.9 dB a partir de la iteración 4, apareciendo en la figura como una misma línea. En cambio, con MTSAC, solo  $HOM(9, 10)$  y  $HOM(9, 12)$  alcanzan el valor límite de -6.9 dB. En estas adyacencias, MTSAC detecta por medio de las trazas de conexión

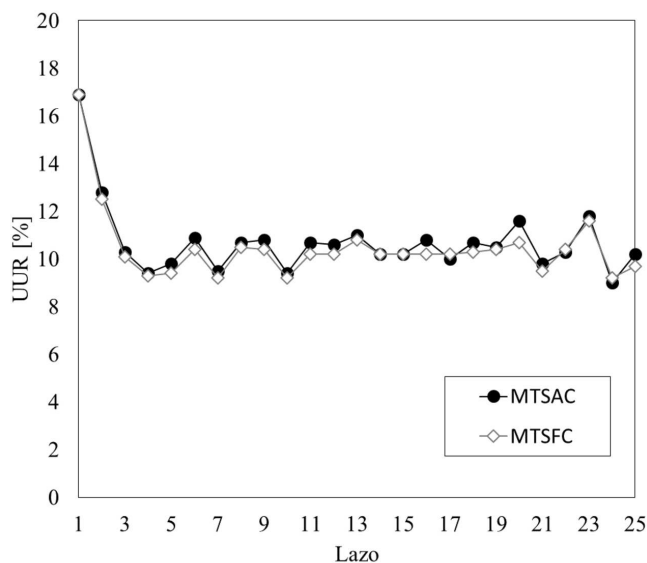


Figura 3.33: Evolución de la tasa de usuarios insatisfechos en las técnicas MTSFC y MTSAC.

que la calidad de señal antes del traspaso es buena, porque  $\overline{SINR}_{HO} > -4$  dB. Por ello, permite reducir los márgenes hasta  $-6.9$  dB, que es el límite con MTSFC. Por el contrario,  $HOM(9, 5)$ ,  $HOM(9, 11)$  y  $HOM(9, 13)$  se paran mucho antes. Así,  $HOM(9, 11)$  nunca desciende de  $-1$  dB, y  $HOM(9, 5)$  y  $HOM(9, 13)$  no modifican su valor inicial de  $3$  dB. En estas adyacencias, se detecta que  $\overline{SINR}_{HO} < -4$  dB. De esta forma, MTSAC puede ser agresivo en aquellas adyacencias que lo permiten, al mismo tiempo que frena aquéllas que pueden reducir el rendimiento de la red.

Por último, la Figura 3.35 compara la evolución de la desviación media del margen de traspaso,  $\overline{\Delta HOM}$ , con MTSFC y MTSAC. Se observa claramente que el cambio de márgenes con MTSAC es casi 10 veces menor que con MTSFC ( $0.1$  dB con MTSAC frente a  $0.9$  dB con MTSFC), aunque de forma puntual algunas adyacencias alcancen valores mucho mayores. Por ello, puede concluirse que las modificaciones realizadas en el  $HOM$  por MTSAC son más eficientes.

### 3.4.2.5. Experimento A5: Reparto de tráfico en edificio - posición de femtoceldas

Todos los resultados presentados en este trabajo han sido obtenidos en un escenario regular, donde las femtoceldas se colocan de manera simétrica en cada planta e idéntica en todas las plantas. Para comprobar el impacto de introducir irregularidades en la distribución de las femtoceldas, se realiza una nueva campaña de simulaciones en 10 escenarios en los que las femtoceldas se distribuyen de forma asimétrica en el edificio. En cada uno de esos 10 escenarios, se repiten los experimentos A1, A2 y A3, en los que las técnicas actúan en 1 planta, 3 plantas y 5

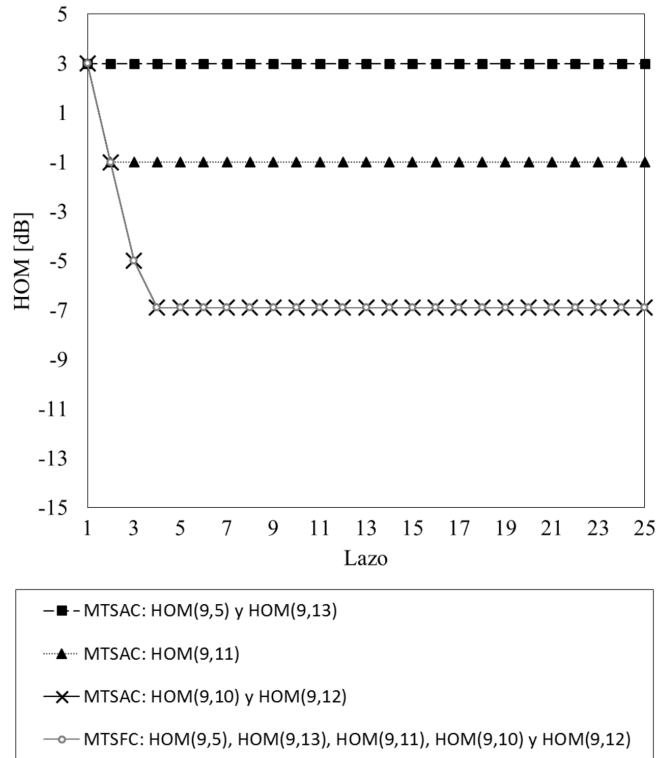


Figura 3.34: Evolución del margen de traspaso de la femtocelda más cargada (femtocelda 9) con sus vecinas más importantes para MTSFC y MTSAC.

plantas. La Figura 3.36 presenta la mejora relativa de  $UUR$  obtenida por cada una de las técnicas en los experimentos A1, A2 y A3 en los 10 escenarios irregulares. Por claridad, se representan sólo los estadísticos de la media (aspa), máximo (cota superior) y mínimo (cota inferior). Como referencia de comparación, se incluyen también los resultados con posicionamiento regular (escenarios 1, 2 y 3, nombrados en el pie de figura como E1, E2 y E3). La mejora relativa de  $UUR$  se calcula como

$$\Delta UUR_r = \frac{UUR^{(0)} - UUR^{(N)}}{UUR^{(0)}} , \tag{3.22}$$

donde  $UUR^{(0)}$  es el valor de  $UUR$  obtenido con la configuración original y  $UUR^{(N)}$  es el valor de  $UUR$  obtenido tras el proceso de optimización. Evaluando la mejora relativa, y no la mejora absoluta, se pretende compensar el hecho de que la disposición de las femtoceldas afecta al valor inicial de  $UUR$ ,  $UUR^{(0)}$ .

En la figura, se observa que, tanto con MTS como con PTS en los escenarios 1 y 2, la mejora de  $UUR$  para el escenario regular es igual o menor que la menor mejora de  $UUR$  para los casos de posicionamiento irregular. El caso de PTS en el escenario 2 es especialmente llamativo, porque en todas los escenarios irregulares se obtiene una mejora (decremento) de  $UUR$ , mientras que en el escenario regular no se consigue. La razón es que cuando la ubicación de las femtoceldas en

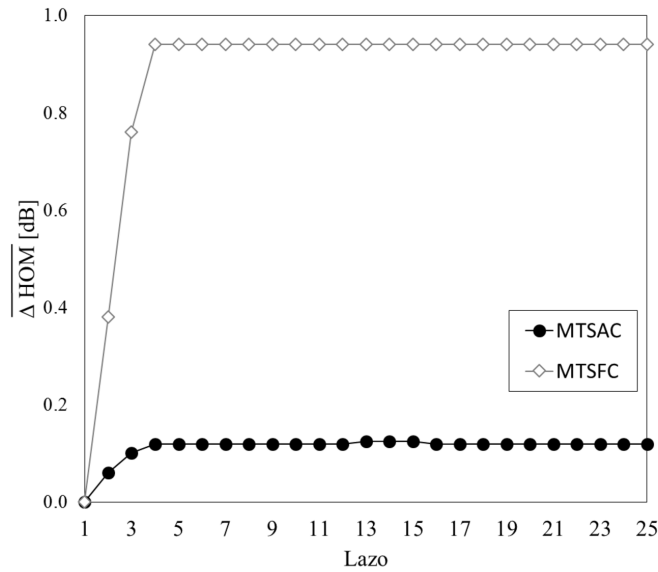


Figura 3.35: Evolución de la desviación media del margen de traspaso para MTSFC y MTSAC en el escenario 3.

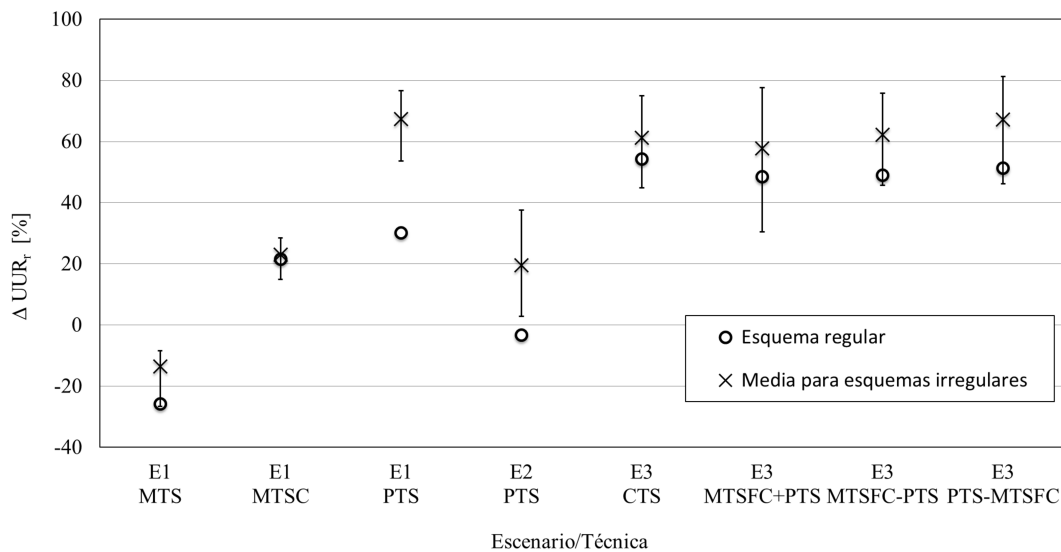


Figura 3.36: Mejora de tasa de usuarios insatisfechos en escenarios con distribución irregular de femtoceldas.

dos plantas es la misma, la diferencia de nivel de señal entre ambas es siempre equivalente a la atenuación introducida por el forjado, ya que la señal de ambas femtoceldas recorre el mismo camino, exceptuando el paso de una de ellas a través del forjado. Por el contrario, cuando las femtoceldas de diferentes plantas tienen ubicaciones distintas, aparecen zonas donde la diferencia de nivel de señal es mayor a la atenuación del forjado y otras donde es menor, siendo en estas últimas

donde el reparto de tráfico se lleva a cabo de forma más sencilla que en el caso regular. Por todo ello, el caso regular puede considerarse como un caso peor para el reparto de tráfico en estas situaciones.

En cuanto a MTSFC en el escenario 1, donde la restricción de los márgenes detiene el proceso de optimización muy pronto, la mejora de  $UUR$  en el caso regular es un caso intermedio en comparación con la obtenida en los 10 escenarios irregulares. Para las técnicas combinadas en el escenario 3, la mejora de  $UUR$  en el escenario regular está siempre por debajo de la media obtenida en los escenarios irregulares, y en algunos casos (p.ej., MTSC-PTS y PTS-MTSC) está muy cerca del mínimo obtenido en éstos.

De estos resultados, puede concluirse que el funcionamiento de todas las técnicas en escenarios irregulares es similar al observado en el escenario regular, que suele ser el caso más desfavorable. Por tanto, las conclusiones obtenidas en los anteriores experimentos son válidas para cualquier disposición de las femtoceldas. Más importante aún es el hecho de que en todos los casos (excepto MTS en el escenario 1, por las razones ya conocidas y que son resueltas por MTSFC) se consigue una mejora de  $UUR$  positiva, prueba sin duda de la robustez de todas las técnicas de reparto presentadas en este trabajo.

### 3.5. Conclusiones

En este capítulo se han propuesto varios métodos de reparto de tráfico en un escenario de oficinas tridimensional con femtoceldas LTE. Los métodos se basan en el ajuste de los márgenes de traspaso,  $HOM$ , y/o la potencia de transmisión de las femtoceldas,  $P_{TX}$ , mediante controladores de lógica difusa.

Para validar los distintos métodos se ha utilizado el simulador de red de femtoceldas LTE a nivel de sistema descrito en el Anexo A. Este simulador incluye un escenario de simulación con tres macroceldas y un edificio de varias plantas en el área de cobertura de una de ellas. Cada planta del edificio incluye 4 oficinas, con una femtocelda en cada una de ellas. Los resultados de simulación han mostrado que los métodos propuestos son capaces de disminuir el número de llamadas bloqueadas, aunque algunos de ellos deterioran significativamente la calidad de conexión en la red. Habiéndose identificado la interferencia procedente de la femtocelda congestionada como una limitación importante, se ha decidido limitar la variación de los márgenes de traspaso. De esta manera, el decremento de la congestión se consigue sin deteriorar la calidad de la conexión significativamente.

Una vez caracterizadas las limitaciones de los métodos cuando se aplican individualmente, se han diseñado estrategias combinadas para superar estas limitaciones. Los resultados han mostrado que, sacando el máximo partido a la variación de los márgenes antes de modificar la potencia transmitida, se pueden reducir las variaciones de potencia, lo que reduce el riesgo de crear huecos de cobertura. En el escenario concreto considerado, estas estrategias combinadas consiguen reducciones de la tasa de bloqueo del 15% sin empeorar la calidad de las conexiones

excesivamente. Con ello se consigue una mejora del rendimiento global, medido a través de la tasa de usuarios insatisfechos, de hasta el 9 %.

Asimismo, se han puesto a prueba todas las técnicas diseñadas, tanto en sus aproximaciones individuales como combinadas, en el mismo escenario pero con distribución irregular de las femtoceldas. Los resultados han demostrado la robustez de estas técnicas, que en (prácticamente) todos los experimentos han conseguido mejorar el rendimiento de la red. En el caso de las técnicas combinadas, las mejoras relativas de la tasa de usuarios insatisfechos alcanzan valores de hasta el 80 %, siendo siempre superiores al 30 %. El escenario donde las femtoceldas se posicionan de forma simétrica ha demostrado ser casi siempre el caso más desfavorable en cuanto a reparto de tráfico se refiere. Por tanto, las conclusiones de los análisis más detallados realizados en los primeros experimentos pueden extenderse a escenarios irregulares, prueba, una vez más, del buen funcionamiento de estas técnicas en cualquier escenario.

Además, se ha diseñado un indicador,  $\overline{STNR}_{HO}$ , que mide la calidad de la conexión de los usuarios antes de realizar un traspaso en una determinada adyacencia. Se ha propuesto usar este indicador como freno de la modificación de márgenes de traspaso para llevar a cabo esta modificación sólo en aquellas adyacencias donde el trasvase de tráfico va a ser efectivo y no va a provocar problemas de calidad en las conexiones. Los resultados han demostrado que haciendo uso de este indicador se consigue el mismo alivio de congestión, pero con una modificación más eficaz de los márgenes, modificación que puede ser hasta un 87 % menor.

Los algoritmos propuestos en este trabajo tratan de resolver problemas de congestión persistentes en el tiempo ajustando lentamente los parámetros en función de los indicadores estadísticos. Para obtener estadísticos fiables, el periodo de medida debe ser lo suficientemente grande (p. ej., 1 hora), lo que limita la frecuencia de variación de los parámetros y, por tanto, la capacidad de hacer frente a fluctuaciones rápidas de la demanda de tráfico. Sin embargo, los métodos pueden adaptarse fácilmente para hacer frente a las fluctuaciones diarias de la red definiendo intervalos de tiempo de varias horas y ajustando los parámetros en base a los indicadores estadísticos de ese mismo periodo de tiempo del día anterior.

Todos los métodos probados se pueden ejecutar en un nodo centralizado (p.ej., servidor SON) o de manera distribuida, siempre y cuando los indicadores de rendimiento de las celdas vecinas estén disponibles. Estos indicadores pueden ser facilitados por el nodo central de forma sencilla, ya que los parámetros se modifican lentamente. Asimismo, los métodos pueden aplicarse a otros escenarios públicos con femtoceldas de acceso abierto (p.ej., aeropuertos o centros comerciales).

## Capítulo 4

# Posicionamiento de femtoceldas

Habiendo observado que la posición de las estaciones base condiciona el funcionamiento de las técnicas de reparto de tráfico, en este capítulo se aborda el problema del posicionamiento de femtoceldas en entornos corporativos. Dicho problema es un caso particular del problema conocido como *Antenna Placement Problem* (APP), tratado profusamente en la bibliografía. En este trabajo, se aborda el problema desde la perspectiva del reparto de tráfico, con el propósito de encontrar la mejor estrategia de despliegue que maximice el rendimiento de las técnicas de alivio de congestión basadas en la modificación de los márgenes de traspaso.

Las estrategias de despliegue de femtoceldas de este trabajo han sido concebidas para formar parte del proceso de planificación de la red de acceso radio en interiores. Su objetivo es mejorar la eficacia del proceso de optimización de parámetros (en concreto, del balance de carga o reparto de tráfico) aplicado durante la operación de la red.

El capítulo se estructura de la siguiente forma. En la Sección 4.1 se realiza un estudio preliminar del problema, que incluye el análisis del estado de la investigación del APP y su extensión al entorno de interiores. Definido el contexto, en la Sección 4.2 se formula el problema del posicionamiento de femtoceldas, definiendo una serie de criterios de diseño que se utilizan en la práctica para fijar las posiciones de las estaciones base en una red celular. Entre los criterios que se describen, se incluye un nuevo criterio para maximizar la capacidad de reparto de tráfico. Seguidamente, en la Sección 4.3 se realiza un análisis preliminar sobre un simulador estático de red de interior para determinar un conjunto de reglas sencillas que permitan al operador fijar la mejor posición de las femtoceldas atendiendo a diferentes criterios. Fruto de este análisis, se obtiene un esquema de posicionamiento de femtoceldas para cada uno de los criterios definidos. En la Sección 4.4 se describen los experimentos realizados para evaluar el impacto de cada uno de los criterios de posicionamiento en la capacidad de reparto de tráfico de las técnicas de balance de carga mediante el traspaso. Por último, en la Sección 4.5, se presentan las conclusiones de este capítulo.



## 4.1. Estado de la investigación y la tecnología

La selección del emplazamiento de cada nueva estación base es la tarea más importante que deben realizar los operadores celulares durante la fase de planificación. La ubicación de una estación base determina su rendimiento durante la fase de operación. Una ubicación deficiente puede impedir la consecución de los niveles de servicio requeridos, no pudiendo compensarse mediante los procesos de optimización durante la fase de operación. Esta importancia justifica el gran número de estudios dedicados a este problema.

El APP puede formularse como un problema de optimización discreta donde las variables de diseño son las coordenadas (discretas) de las antenas y la función objetivo puede ser cualquier combinación de indicadores de rendimiento de red que reflejen la cobertura, la capacidad y la calidad de conexión en la red. Debido al gran tamaño del espacio de soluciones y la interdependencia entre los nuevos emplazamientos y los ya existentes, el problema pertenece a la clase de problemas conocidos como *NP-complejo* (*Non-deterministic Polynomial-time hard*, *NP-hard*) [60]. Por la complejidad de resolver el problema de manera exacta, el APP suele resolverse de forma heurística.

Las contribuciones encontradas en la literatura para resolver este problema pueden clasificarse según el escenario considerado (exterior o interior), el criterio de diseño utilizado para el posicionamiento de las antenas (cobertura, capacidad y/o calidad), la tecnología de acceso radio (*Time Division Multiple Access/Frequency Division Multiple Access*, TDMA/FDMA, *Wideband Code Division Multiple Access*, WCDMA o OFDMA) y el tipo de algoritmo utilizado para resolver el problema (exacto o heurístico).

Un primer grupo de referencias intenta encontrar la mejor posición para las antenas en escenarios de exterior. Anderson *et al.* [61] usan un método de recocido simulado (*Simulated Annealing*, SA) para resolver el problema en un entorno de microceldas TDMA/FDMA basándose en indicadores de nivel de señal. En [62], la selección de emplazamientos WCDMA se formula como un problema de programación lineal entera con una función de coste basada en criterios de cobertura, que se resuelve utilizando el método de búsqueda tabú (*Tabu Search*, TS). En [63], el APP se resuelve para encontrar el mínimo número de antenas que garantiza un nivel mínimo de señal o, lo que es lo mismo, que garantiza un nivel de cobertura en un área dada. En [64], se proponen varios algoritmos genéticos para maximizar la cobertura en GSM mientras se satisface un mínimo nivel de *SINR*. En [65] y [66], se lleva a cabo un análisis de sensibilidad del rendimiento de la red comprobando el impacto de la posición de las antenas y su ángulo de inclinación en la capacidad máxima de una red WCDMA con distribución de tráfico irregular. En [67], se proponen varios algoritmos heurísticos para resolver el APP con el objetivo de minimizar conjuntamente los costes de instalación, la calidad de la señal y la cobertura en una red WCDMA.

Un segundo grupo de referencias aplica los métodos anteriores en escenarios interiores. En algunos trabajos, el APP se formula para minimizar las pérdidas

de trayecto (o, equivalentemente, maximizar la cobertura) y posteriormente se resuelve utilizando un método de optimización de propósito general, como, por ejemplo, un algoritmo genético [68], un método de búsqueda directa [69], recocido simulado [70] o un método heurístico [71]. De forma similar a [63], en [72] se propone un modelo de programación entera binaria para encontrar el mínimo número de antenas que garanticen un mínimo nivel de  $SINR$  en los canales ascendente y descendente en una red de interior *Code Division Multiple Access* (CDMA). En [73], se presenta un método heurístico para posicionar las antenas en un escenario WCDMA interior donde deben cumplirse unas condiciones mínimas de  $SINR$  en los canales ascendente y descendente. Los estudios más recientes se centran en la optimización de la  $SINR$  en WCDMA utilizando métodos exactos, como la búsqueda por fuerza bruta [74], o métodos heurísticos, como el enjambre de partículas [75] y una aproximación por reducción [76]. En [77], se propone un método de posicionamiento de femtoceldas LTE para maximizar la tasa de transmisión media. Por último, en [78], se propone un método de posicionamiento de femtoceldas para minimizar la potencia transmitida por los equipos móviles. Con un objetivo completamente distinto, en [79, 80] se proponen métodos para decidir la mejor posición para un emplazamiento *WiFi* que mejore la precisión de los métodos de localización de los equipos móviles en interiores.

La mayoría de las referencias mencionadas se centran en la eficiencia computacional del método para encontrar la posición óptima de las antenas, y en el rendimiento de la solución final propuesta. Sin embargo, no se realiza un análisis detallado de las características del esquema de posicionamiento obtenido. En consecuencia, en ninguna de ellas se proponen reglas básicas para llegar a soluciones del APP que sean cercanas a la solución óptima, sin la necesidad de realizar un proceso de optimización en un escenario real. Además, todas las referencias comparten como criterios de diseño la cobertura, la calidad de señal y la capacidad dada una distribución espacial de tráfico conocida. Con ello, no se ha encontrado en la literatura ningún estudio que evalúe el impacto del posicionamiento de antenas sobre las técnicas de reparto de tráfico utilizadas para hacer frente a los cambios de la distribución de tráfico.

En este trabajo, el objetivo no es definir un método exacto y complejo para el posicionamiento de femtoceldas en entornos corporativos. En escenarios macrocelulares tiene sentido realizar un proceso de planificación cuidadoso, porque, al cubrir éstos grandes áreas, afectan a un gran número de usuarios. Las condiciones de propagación en estos entornos están suficientemente estudiadas, y, una vez caracterizadas, varían poco con el tiempo. Ello justifica el uso de métodos sofisticados de búsqueda de la solución óptima al problema del posicionamiento de antenas. Sin embargo, estas condiciones no se dan en los entornos de interior. Por un lado, el gran número de estaciones base a planificar en interior impide aplicar cualquier método que sea complejo en términos de computación. Al mismo tiempo, de nada sirve disponer de un método de optimización muy preciso si los modelos del entorno presentan inexactitudes por la complejidad de la propagación en interiores.

En la bibliografía, la mayoría de estudios recientes han tratado de extender la metodología de trabajo empleada en escenarios macrocelulares a escenarios

de interior. Su principal aportación son métodos de optimización más o menos sofisticados para encontrar la disposición de las estaciones base de interior que maximice un determinado indicador.

La mayor parte de los indicadores empleados en la literatura para resolver el problema de posicionamiento de estaciones base están basados en criterios de cobertura y calidad de conexión, y, más específicamente para LTE, en RSRP y *SINR*. Estos indicadores no tienen un impacto directo sobre la capacidad de las técnicas de reparto de tráfico mediante traspaso. Estas técnicas se consideran de gran importancia en este tipo de redes, donde la falta de una planificación adecuada provoca que la aparición de problemas de congestión sea algo habitual. Para potenciar estas técnicas, es necesario disponer de un indicador que cuantifique su capacidad de reparto de tráfico, que pueda tenerse en cuenta en la resolución del problema de posicionamiento de femtoceldas.

En este capítulo, se pretende proporcionar un método sencillo que ayude a decidir la posición adecuada de una femtocelda dentro de un edificio de oficinas. Así, se persigue dar solución al problema de posicionamiento de femtoceldas en un edificio proporcionando una serie de estrategias de sencilla aplicación para mejorar diferentes indicadores de rendimiento, no solo los habitualmente utilizados, sino también un indicador que pueda cuantificar la capacidad de reparto de tráfico de las técnicas basadas en modificación de márgenes de traspaso. Aunque para la obtención de estas estrategias se hace uso de modelos de propagación y cálculos de gran carga computacional, la aplicación de estas estrategias debe basarse en la aplicación de una serie de reglas sencillas y que en ningún caso requiera cálculos complejos. De esta forma, el posicionamiento de femtoceldas puede llevarse a cabo sin necesidad de un conocimiento elevado ni unas herramientas sofisticadas.

## 4.2. Formulación del problema

El problema de la selección de emplazamiento de las estaciones base de una red celular se puede formular como un problema de optimización discreta, en el que la función objetivo que se optimiza se corresponde con algún indicador de rendimiento principal de la red [8]. En esta sección se describen diferentes criterios de diseño para seleccionar la mejor ubicación de las femtoceldas en un espacio de interior. Cada uno de los criterios propuestos tiene como fin optimizar un cierto indicador de rendimiento de red. Todos los criterios aquí presentados son extensibles a la selección de emplazamientos de macroceldas.

Se describen cuatro criterios para seleccionar los emplazamientos de estaciones base. Tres de ellos están inspirados en la bibliografía, como son: a) la reducción de las pérdidas de trayecto (o, equivalentemente, el aumento de los niveles de señal recibida), para mejorar las condiciones globales de cobertura [68, 69, 70, 71], b) el aumento de los promedios de *SINR*, para mejorar la eficiencia espectral del sistema [77], y c) el incremento de los valores mínimos de *SINR*, como mejora de las condiciones de los usuarios de borde de celda [72, 73]. El cuarto criterio,

propuesto en este estudio, es el aumento del solapamiento entre celdas vecinas, para mejorar la eficacia de las técnicas de reparto de tráfico. En los siguientes apartados se detallan las fórmulas de las funciones objetivos utilizadas en cada uno de los criterios.

#### 4.2.1. Mínima pérdida de trayecto media

La pérdida de trayecto media,  $\overline{PL}$  (*PathLoss*), es una medida de la cobertura obtenida por un esquema de posicionamiento dado. Este indicador se calcula como el promedio de las pérdidas desde la celda servidora en cada punto del escenario, expresado como

$$\overline{PL} = \text{Media}(\underset{j}{\text{mín}} (PL(i, j))), \quad (4.1)$$

donde  $PL(i, j)$  son las pérdidas de trayecto (en dB), desde la femtocelda  $i$  hasta el punto  $j$  del escenario, que dependen de la posición de la femtocelda, la posición del punto y el entorno de propagación, y la operación  $\underset{j}{\text{mín}}(\cdot)$  determina que la celda servidora en un punto es aquélla que ofrece las mínimas pérdidas de trayecto en ese punto.

#### 4.2.2. Máxima peor calidad de conexión

En este trabajo, el percentil del 10 % de la distribución global de  $SINR$  en el canal descendente,  $L_{10\%,DL}SINR$ , se toma como una medida de los problemas de calidad que aparecen en el borde de celda con un determinado esquema de posicionamiento de estaciones base. Asumiendo que todas las femtoceldas utilizan la misma  $P_{TX}$ , que transmiten en el mismo ancho de banda y que el suelo de ruido es despreciable, la  $SINR$  del canal descendente en cada punto del escenario  $j$  (en dB) se puede aproximar por

$$SINR_{DL}(j) \simeq -PL(s(j), j) + 10 \cdot \log \sum_{\forall i \neq s(j)} P_{col}(s(j), i) \cdot 10^{-\frac{PL(i, j)}{10}}, \quad (4.2)$$

donde  $s(j)$  es la femtocelda servidora en el punto  $j$  (es decir, la femtocelda con menores pérdidas de trayecto en dicho punto), y  $P_{col}(s(j), i)$  (de probabilidad de colisión) es la probabilidad de que la femtocelda  $s(j)$  transmita en el mismo PRB que la femtocelda  $i$ . En la mayoría de las herramientas de planificación de red,  $P_{col}(s(j), i)$  se aproxima por la tasa de ocupación de PRB en la femtocelda  $i$ . Una vez calculada la  $SINR_{DL}$  en todos los puntos del escenario, se construye la función de distribución global de dicha variable agregando todas las muestras del escenario, a partir de la cual se calcula el percentil del 10 % tal que

$$p(SINR_{DL}(j) \leq L_{10\%,DL SINR}) = 0.1 . \quad (4.3)$$

En este caso, el valor obtenido depende de la posición de las femtoceldas, del entorno de propagación y de la tasa de ocupación de PRB de cada femtocelda.

### 4.2.3. Máxima calidad de conexión media

El promedio de la relación señal a ruido e interferencia en el enlace descendente a lo largo del escenario,  $\overline{SINR}_{DL}$ , es una medida de la calidad de conexión ofrecida a los usuarios con un determinado esquema de posicionamiento de estaciones base. El indicador se calcula como la media de  $SINR_{DL}$  en cada punto del escenario:

$$\overline{SINR}_{DL} = Media_j(SINR_{DL}(j)) , \quad (4.4)$$

donde la  $SINR_{DL}$  de cada punto se obtiene como en 4.2. El valor así obtenido depende de la posición de las femtoceldas, del entorno de propagación y de la tasa de ocupación de PRB de cada femtocelda.

### 4.2.4. Máximo solapamiento entre celdas

En este último criterio, el tamaño de las áreas de baja dominancia se usa para estimar el grado de solapamiento entre femtoceldas obtenido con un determinado esquema de posicionamiento. Se entiende que, en un punto  $j$  del escenario, existe solapamiento entre celdas vecinas cuando la diferencia de las pérdidas de trayecto entre la celda servidora y su vecina más próxima es pequeña. Dicha situación se expresa de manera formal como

$$\min_k (PL(k, j) - PL(s(j), j)) \leq \Delta PL \quad \forall k \neq s(j) , \quad (4.5)$$

donde  $s(j)$  es la femtocelda servidora en el punto  $j$  y  $\Delta PL$  es el umbral de pérdidas de trayecto que determina las condiciones de baja dominancia. En este estudio,  $\Delta PL = 3$  dB.

El grado de solapamiento entre femtoceldas se cuantifica como la tasa global de baja dominancia,  $LDR$  (*Low Dominance Ratio*), definida como

$$LDR = \frac{N_{LD}}{N} , \quad (4.6)$$

donde  $N_{LD}$  es el número de puntos en baja dominancia y  $N_E$  es el número total de puntos del escenario. El valor de este indicador depende de la posición de las femtoceldas y del entorno de propagación.

### 4.3. Diseño de estrategias de posicionamiento de femtoceldas

Tras establecer los criterios de diseño, en esta sección se definen las pautas para seleccionar la ubicación de femtoceldas atendiendo a dichos criterios en escenarios de oficinas. Dichas pautas no se formulan como un algoritmo cerrado, sino como una serie de recomendaciones de carácter general que deben considerarse a la hora de construir los planes de emplazamiento en estos escenarios. Tales recomendaciones se deducen de una serie de experimentos realizados en un simulador estático de nivel de sistema. La aplicación de dichas normas en el edificio considerado en este trabajo da lugar a diferentes esquemas de posicionamiento, que se utilizan después para evaluar el impacto de la posición de las femtoceldas en las técnicas de reparto de tráfico. En los siguientes apartados se presenta la metodología de análisis seguida para deducir las reglas y los resultados obtenidos.

#### 4.3.1. Metodología de análisis

El análisis se realiza sobre el mismo escenario utilizado en el Capítulo 3, consistente en un edificio de oficinas de 5 plantas. La dimensión de cada planta es de 50 x 50 m<sup>2</sup>, y cada una de ellas contiene 4 oficinas dispuestas de forma simétrica respecto al centro.

Al contrario del resto de experimentos, en este análisis no se hace uso del simulador dinámico descrito en el Anexo A, sino únicamente del escenario y el modelo de propagación que se implementan en el mismo [57].

Para facilitar la extracción de conclusiones, en este análisis no se considera el desvanecimiento lento. De esta manera, se asegura que los esquemas de localización obtenidos dependen únicamente de la geometría del escenario, y no de aspectos aleatorios, como la realización específica de las pérdidas de desvanecimiento lento. Asimismo, para el cálculo de la *SINR*, se considera una distribución espacial de tráfico uniforme y una carga del sistema completa (es decir, utilización de PRB del 100%), de forma que  $P_{col}(i, j) = 1 \quad \forall i, j$ .

Con estas consideraciones, se resuelve el APP en los escenarios considerados para cada uno de los criterios de diseño de la Sección 4.2. En cada caso, el objetivo es optimizar el indicador correspondiente, con la única restricción de que exista una femtocelda por oficina. De esta manera, se obtienen 4 esquemas de ubicación de femtoceldas, que describen las posiciones de las femtoceldas que maximizan cada uno de los criterios establecidos. Estos cuatro esquemas, a los que se nombra como CL (*Coverage Layout*), WSL (*Worst-case SINR Layout*), ASL (*Average SINR Layout*) y OvL (*Overlapping Layout*), son la solución al APP con los criterios de pérdida de trayecto media mínima, peor calidad de conexión máxima, calidad de conexión media máxima y solapamiento entre femtoceldas máximo, respectivamente.

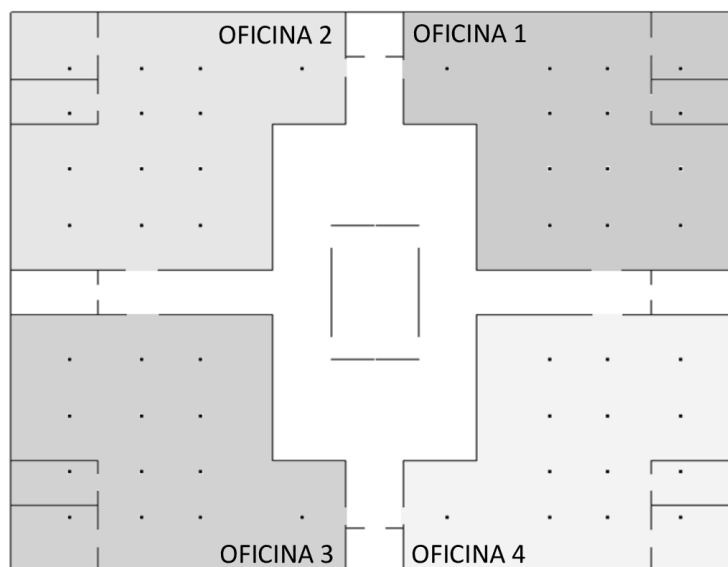


Figura 4.1: Rejilla de posibles posiciones para las femtoceldas.

Para resolver cada instancia del APP, se emplea un método de búsqueda exhaustiva por fuerza bruta. Por razones de eficiencia computacional, la búsqueda del esquema óptimo de localización de femtoceldas para cada criterio se divide en tres etapas.

En una primera etapa, la búsqueda se limita a un escenario de una sola planta. Así, en esta etapa, se obtiene la posición de las 4 femtoceldas que optimiza el criterio correspondiente asumiendo que no hay femtoceldas en otras plantas. Para reducir el espacio de soluciones, se limita la posición de las femtoceldas a un conjunto de puntos discreto. Para ello, el área de cada oficina se divide en una rejilla de 13 puntos, que indican las posibles posiciones de las femtoceldas, tal como muestra la Figura 4.1. El número finito de posibles posiciones para las femtoceldas podría reflejar las restricciones debidas al cableado del edificio (puntos de acceso a la red eléctrica y telefónica) o restricciones de mantenimiento, como se contemplan en [81]. Como la posición de cada femtocelda se reduce a 13 puntos candidatos, la búsqueda de la posición óptima para las 4 femtoceldas de una planta requiere evaluar el rendimiento de 28561 ( $= 13 \times 13 \times 13 \times 13$ ) esquemas de posicionamiento distintos. Obsérvese cómo algunas posiciones se alojan dentro de las habitaciones de las esquinas del edificio. Para cada esquema de posicionamiento, se calculan los cuatro indicadores de rendimiento descritos (es decir,  $\overline{PL}$ ,  $L_{10\%,DL}SINR$ ,  $\overline{SINR}_{DL}$  y  $LDR$ ) en todas las posibles posiciones de los usuarios. Dichas posiciones de usuario se definen por una rejilla de 51 x 51 puntos que cubre las 4 oficinas con un metro de resolución, tal como muestra la Figura 4.2. En las figuras anteriores, se establece la numeración de las oficinas del escenario de 1 planta, que se utiliza más adelante para interpretar los resultados del análisis.

En una segunda etapa, se extiende el análisis a una segunda planta. Con este propósito, se añade una nueva planta con 4 oficinas encima de la planta original. El

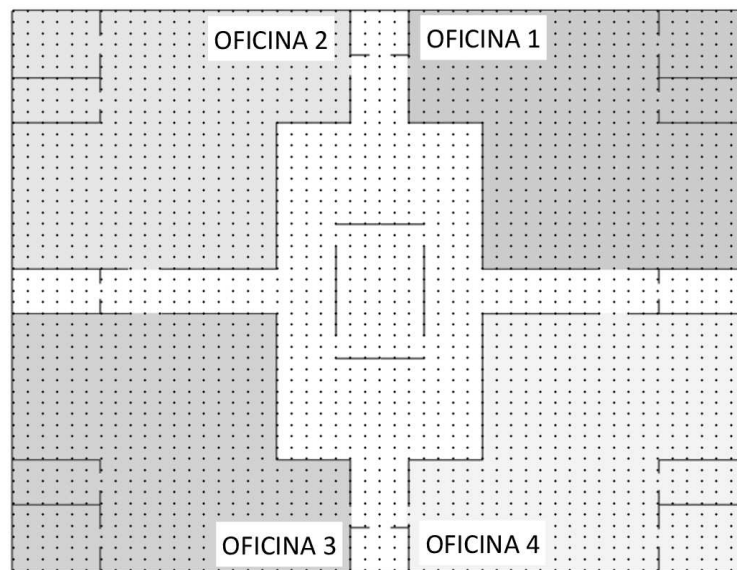


Figura 4.2: Rejilla de posibles posiciones de los usuarios.

objetivo de esta segunda etapa es doble. En primer lugar, se pretende comprobar el impacto de las femtoceldas de una planta superior (inferior) sobre el rendimiento de las femtoceldas de una planta inferior (superior). En segundo lugar, y más importante, se busca comprobar si incluir femtoceldas en otras plantas hace que el patrón de posicionamiento óptimo obtenido para una planta sea distinto.

La inclusión de 4 nuevas femtoceldas añade 4 nuevos grados de libertad en el diseño, cada uno de ellos con 13 posibles posiciones. En consecuencia, el nuevo número de posibles combinaciones sería de  $13^8$ . Para reducir la carga computacional, el espacio de soluciones se reduce fijando la posición de las femtoceldas en una de las plantas (oficinas 1-4) a sus posiciones en la solución óptima para una planta. De esta forma, las únicas femtoceldas con libertad de movimiento son las de la nueva planta, y el número de diferentes combinaciones vuelve a ser de  $13^4$ . Aun así, el número de casos a evaluar es 4 veces mayor que para el caso de 1 planta, ya que la posición de las femtoceldas de la primera planta es distinta para los 4 indicadores bajo estudio. El precio a pagar por fijar la posición de 4 de las 8 femtoceldas es la imposibilidad de encontrar la solución óptima para el caso de dos plantas. Una vez definidas las posiciones de las femtoceldas, se realiza el cálculo de los indicadores utilizando la rejilla de puntos de usuario extendida a ambas plantas.

Llegado este punto, se dispone de unas reglas de diseño para escenarios de 1 y 2 plantas. Haciendo uso del conocimiento adquirido, en una tercera etapa se construye un esquema de posicionamiento de femtoceldas para el escenario completo (con 5 plantas y 4 femtoceldas por planta) para cada uno de los criterios de diseño. Por desgracia, el gran tamaño del espacio de soluciones hace inviable la búsqueda de la mejor solución de manera exacta. Encontrar la mejor posición para  $5 \times 4 = 20$  femtoceldas requeriría calcular el valor de cada indicador en todas



las posiciones de usuario del escenario para  $13^{20}$  esquemas de localización, algo que, obviamente, es inviable desde el punto de vista computacional. Por ello, al contrario que las soluciones anteriores, los esquemas de posicionamiento obtenidos en esta tercera etapa no son el resultado de un proceso de optimización. No existe, por tanto, garantía de que el esquema obtenido en el escenario completo para cada criterio corresponda al esquema de posicionamiento óptimo para ese criterio. Aun así, a posteriori, se demuestra que la extensión de las reglas obtenidas para 1 y 2 plantas al caso de 5 plantas lleva a soluciones que presentan un rendimiento muy alto en base al criterio empleado.

En esta tercera etapa, se impone una restricción adicional que asegure que la solución final no favorezca a los usuarios de una oficina a expensas de los de otra, aunque de esta manera se aumentara el rendimiento global de la red. Esta restricción de equidad entre oficinas se utiliza para descartar las soluciones que, construidas con los criterios de diseño expuestos, sean injustas entre oficinas. Con ello, se pretende que, al igual que ocurre en la planificación de una red real, no se perjudiquen grupos de usuarios según su posición en el escenario.

### 4.3.2. Resultados del análisis

En este apartado se analizan los esquemas de posicionamiento de femtoceldas obtenidos con la metodología del apartado anterior. Primero, se realiza un análisis cualitativo de las soluciones de posicionamiento obtenidas con cada criterio de diseño. Para cada criterio, se presenta, sobre un plano del edificio, la disposición óptima de la femtoceldas para 1, 2 y 5 plantas. El objetivo de este análisis cualitativo es identificar las propiedades que debe tener un plan de posiciones de femtoceldas que maximice cada uno de los criterios de diseño. Posteriormente, se presenta un análisis cuantitativo, donde se compara el valor de los indicadores de rendimiento en el escenario completo de 5 plantas para los distintos esquemas de posicionamiento. Los objetivos de este análisis cuantitativo son: a) validar las reglas heurísticas obtenidas del análisis cualitativo, demostrando que, con su aplicación, es posible obtener un buen valor del indicador correspondiente a cada criterio, y b) cuantificar el deterioro de los indicadores de rendimiento cuando se emplean esquemas de posicionamiento diseñados con otros criterios. Durante todo el estudio, se presta especial atención al esquema de posicionamiento construido con el indicador de solapamiento propuesto en este trabajo.

#### 4.3.2.1. Mínima pérdida de trayecto media (CL)

Las Figuras 4.3(a)-(c) muestran el esquema de posicionamiento de femtoceldas que minimiza  $\overline{PL}$  (es decir, CL) para 1, 2 y 5 plantas, respectivamente. En la Figura 4.3 (a) se presenta CL para 1 planta. Tal como se describe en el apartado anterior, en el análisis de 1 planta, la solución mostrada es la que presenta mínimo  $\overline{PL}$  de todas las combinaciones posibles de las posiciones de las femtoceldas en las oficinas 1, 2, 3 y 4. De la figura, se deduce que la posición óptima de las femtoceldas

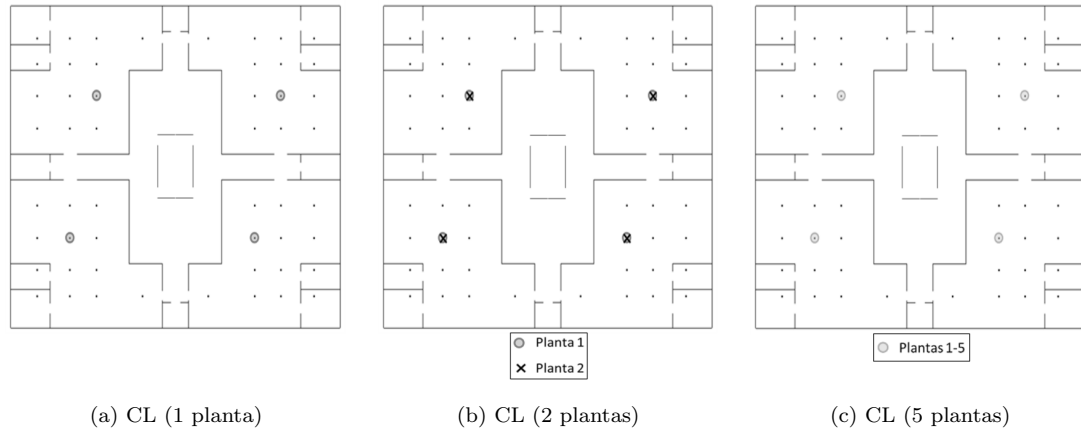


Figura 4.3: Posición de las femtoceldas que minimiza las pérdidas del camino.

(marcada con círculos) debe estar lo más centrada posible dentro de la oficina a la que pertenece. Es reseñable el hecho de que la posición de las femtoceldas no es la misma en todas las oficinas, sino que dos de ellas se acercan a las zonas comunes para cubrir mejor las mismas, mientras que las otras dos se acercan a la habitación de la esquina, que es la zona más aislada en el interior de cada oficina.

La Figura 4.3(b) ilustra el esquema de posicionamiento CL para el escenario de dos plantas. Recuérdese que, en este caso, solo las femtoceldas de la planta 2 tienen libertad de movimiento, mientras que las femtoceldas de la planta 1 han quedado fijadas a la solución obtenida en el caso de 1 planta. La posición de las femtoceldas de la planta 1 se representa mediante un círculo, mientras que las femtoceldas de la planta 2 se representan por un aspa. Como puede apreciarse, la posición de las femtoceldas de la planta 2 que optimiza  $\overline{PL}$  es exactamente igual a la obtenida para la planta 1. Este resultado es lógico, ya que las pérdidas de trayecto en cada punto dependen de la celda servidora y ésta rara vez se encuentra en otra planta, debido a la gran atenuación introducida por el forjado ( $FL = 17$  dB, como se muestra en la Tabla (A.1) del Anexo A [57]). De esta última observación, puede deducirse que, en lo que a las pérdidas de trayecto de la celda servidora se refiere, la existencia de femtoceldas en una planta no afecta a la posición óptima de las femtoceldas del resto de plantas.

Por consiguiente, las reglas básicas deducidas de las soluciones óptimas de 1 y 2 plantas son que:

1. La posición de cada femtocelda debe ser lo más centrada posible dentro del área de cobertura prevista (en este caso, su oficina).
2. La pérdida de trayecto media puede reducirse desplazando ligeramente la posición de la femtocelda, acercándola a zonas más aisladas dentro del área de cobertura (p.ej., habitaciones apartadas o zonas comunes, como pasillos o recibidores).

3. El problema de posicionamiento de femtoceldas en un edificio de varias plantas en términos de cobertura puede separarse en problemas de posicionamiento independientes, uno por cada planta.

Con estas reglas básicas, y viendo los esquemas obtenidos para 1 y 2 plantas, resulta evidente que el esquema de posicionamiento CL para 5 plantas es el mostrado en la Figura 4.3(c). Este esquema es el resultado de replicar el esquema obtenido para 1 planta en las 5 plantas del edificio. Como puede comprobarse, CL (5 plantas) cumple las reglas 1) y 2), que establecen que cada femtocelda debe estar centrada dentro de su oficina con un pequeño desplazamiento para cubrir las zonas más aisladas dentro del edificio. Asimismo, teniendo en cuenta que, según la regla 3), el posicionamiento puede realizarse de forma independiente para cada planta, y que la solución de cada planta es idéntica a la confirmada como óptima para 1 planta, puede concluirse sin haber evaluado todas las combinaciones posibles de femtoceldas en 5 plantas que, en este caso, la CL (5 plantas) es además el esquema óptimo para este criterio.

#### 4.3.2.2. Máxima peor calidad de conexión (WSL)

Las Figuras 4.4(a)-(c) muestran el esquema de posicionamiento de femtoceldas que maximiza  $L_{10\%,DLSINR}$  (es decir, WSL) para 1, 2 y 5 plantas, respectivamente. En la Figura 4.4 (a) se ilustra la solución obtenida para WSL en 1 planta. Se advierte que, para incrementar el percentil del 10% de  $SINR$  en una planta, es necesario distribuir las femtoceldas de forma asimétrica. Un análisis más minucioso (no mostrado aquí) refleja que, con ese posicionamiento asimétrico de las femtoceldas, se asegura que en las áreas del escenario donde el nivel de señal de la celda servidora es bajo (distribuidor central y pasillos), la señal de una de las femtoceldas domina claramente respecto a la de las otras. Para conseguirlo, es necesario forzar que la posición de las femtoceldas sea tal que la señal de todas las femtoceldas distintas a la servidora deba traspasar el máximo número de muros posible para alcanzar esas áreas problemáticas en términos de cobertura. Como puede comprobarse en la figura, las femtoceldas de las oficinas 1 y 3 dominan en el distribuidor central por cercanía. Al mismo tiempo, las femtoceldas de esas oficinas están situadas en una de las esquinas de su sala, lo que causa que la atenuación desde las mismas hasta los pasillos horizontales sea muy alta, al tener que traspasar 2 muros. En estas condiciones, las femtoceldas de las oficinas 2 y 4 dominan claramente en los pasillos horizontales. Esta dominancia clara en áreas de borde de celda asegura un valor alto de  $L_{10\%,DLSINR}$ , que en cierta manera mide la calidad de los peores usuarios del escenario.

En la Figura 4.4(b) se muestra la solución obtenida para WSL en el escenario de 2 plantas, donde se fijan las femtoceldas de la primera planta a la posición obtenida por WSL en 1 planta, mostrada en la Figura 4.4 (a). Las femtoceldas de la primera planta están representadas por un círculo, mientras que las de la segunda planta lo están por un aspa. Como en el caso de CL, la solución obtenida para la segunda planta es idéntica a la obtenida para la primera. Sin embargo,

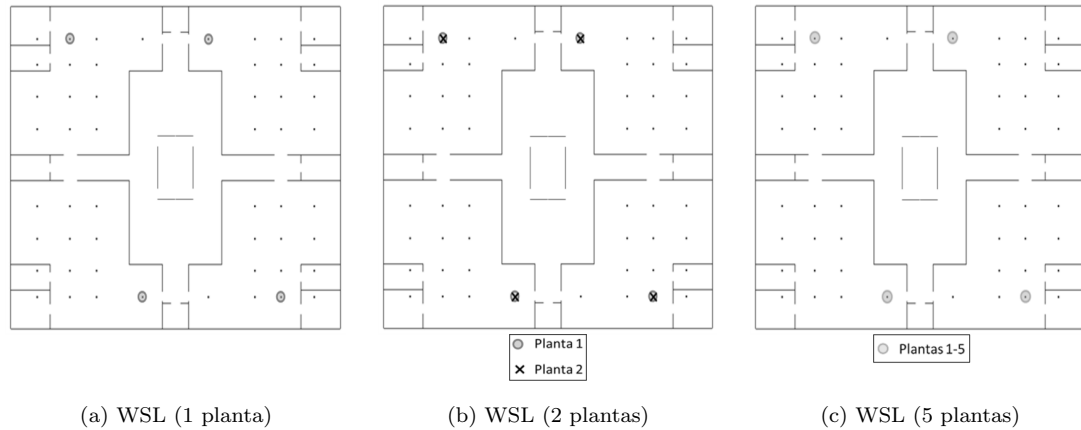


Figura 4.4: Posición de las femtoceldas que maximiza la calidad de conexión peor.

en este caso, el problema no puede tratarse de forma independiente para cada planta. Por el contrario, alineando verticalmente la posición de las femtoceldas en distintas plantas se asegura una diferencia de señal constante y muy elevada entre femtoceldas de distintas plantas, que asegura que la interferencia procedente de femtoceldas de otras plantas sea despreciable (concretamente, 17 dB menor que la señal de la celda servidora, ya que  $FL = 17$  dB).

En consecuencia, las reglas básicas deducidas de las soluciones óptimas de 1 y 2 plantas son que:

1. Un posicionamiento asimétrico de las femtoceldas respecto a áreas comunes favorece una dominancia clara en las zonas con peor cobertura en el borde de celda, lo que incrementa  $L_{10\%,DLSINR}$ .
2. Una vez identificada qué femtocelda sirve cada zona problemática, es conveniente aislar dichas zonas del resto de femtoceldas, posicionando éstas de forma que el número de muros que debe traspasar la señal de ellas para llegar a estas áreas sea el máximo posible.
3. El alineamiento vertical de las femtoceldas de distintas plantas consigue que la interferencia procedente de femtoceldas de otras plantas sea despreciable.

Considerando estas reglas, y viendo los esquemas obtenidos para 1 y 2 plantas, se deduce que el esquema de posicionamiento de femtoceldas WSL más adecuado para 5 plantas es el mostrado en la Figura 4.4(c). Este esquema se consigue repitiendo la solución obtenida para 1 planta en las 5 plantas del edificio. De esta forma, WSL (5 plantas) cumple las reglas 1) y 2) y, con ello, se asegura que, dentro de cada planta, la dominancia de las femtoceldas en las zonas de borde es clara. Alineando verticalmente la posición de las femtoceldas (es decir, repitiendo el mismo esquema en todas las plantas) se asegura que la interferencia de las femtoceldas del resto de plantas sea despreciable.

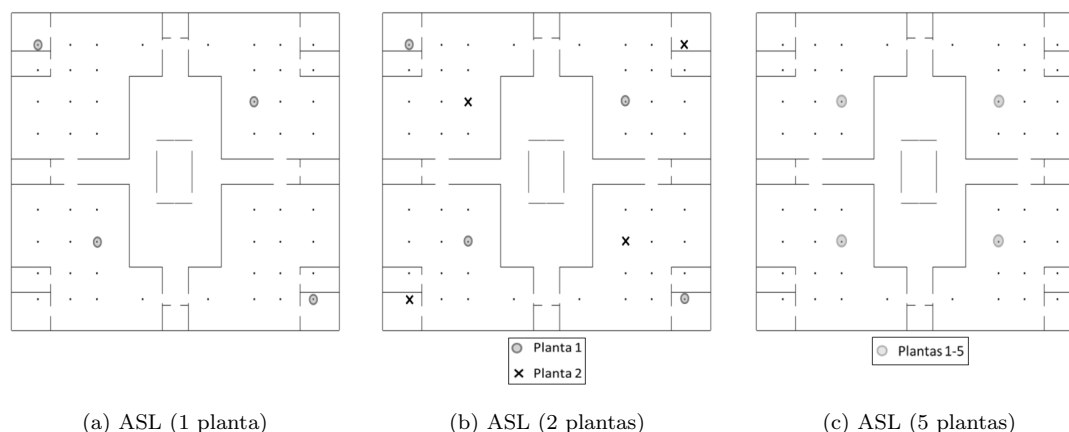


Figura 4.5: Posición de las femtoceldas que maximiza la calidad de conexión media.

#### 4.3.2.3. Máxima calidad de conexión media (ASL)

En las Figuras 4.5(a)-(c) se presenta el esquema de posicionamiento de femtoceldas que minimiza  $\overline{SINR}_{DL}$  (es decir, WSL) para 1, 2 y 5 plantas, respectivamente. La Figura 4.5 (a) muestra la solución obtenida para ASL en 1 planta. En una primera inspección, se observa que, cuando se considera 1 planta, ASL sigue unos principios similares a los que seguía WSL. Situando las femtoceldas de las oficinas 2 y 4 en la habitación más aislada de su oficina, se asegura que para una gran parte del escenario, el trayecto recorrido desde cualquier femtocelda que no es la servidora atraviesa al menos 2 muros. Como consecuencia, el indicador  $\overline{SINR}_{DL}$  se incrementa.

La Figura 4.5(b) presenta la solución obtenida para ASL en el escenario de 2 plantas, donde se fijan las femtoceldas de la primera planta a la posición obtenida en la anterior etapa (Figura 4.5 (a)). Las femtoceldas de la primera y la segunda planta están representadas por un círculo y un aspa, respectivamente. Al contrario de lo que ocurría para los criterios CL y WSL, en ASL para 2 plantas, la posición de las femtoceldas de la primera y segunda planta no es la misma. Se observa que, cuando se añade una nueva planta, las femtoceldas se posicionan siguiendo los mismos principios que en el caso de la primera planta, pero intercambiando la posición de las femtoceldas de las oficinas 1 y 3 por la de las oficinas 2 y 4. Con estos cambios, se trata de aislar, en la medida de lo posible, la femtocelda de una oficina de la femtocelda de la misma oficina de la planta inferior. Siguiendo este criterio se consigue que la interferencia que introducen las femtoceldas en otra planta sea máxima en las zonas de borde y mínima en el resto del área. Por tanto, se mejora la  $SINR$  de la mayor parte del área de servicio a costa de deteriorar la  $SINR$  en las zonas de borde de celda. De esta forma, se incrementa  $\overline{SINR}_{DL}$  al mismo tiempo que se empeora  $L_{10\%,DLSINR}$ .

Así, las reglas básicas deducidas de las soluciones óptimas de 1 y 2 plantas son que:

1. La femtoceldas deben posicionarse de forma que el aislamiento de sus áreas de servicio sea el máximo posible.
2. El aislamiento debe ser más alto en las zonas donde existan más usuarios (en este caso que se considera tráfico uniforme, de forma que se maximice el área donde el aislamiento sea grande). Si, como en este caso, las áreas de fuerte dominancia son más amplias que las zonas de borde, el posicionamiento debe dar prioridad a las áreas de fuerte dominancia.
3. Para mejorar el aislamiento en las zonas deseadas, es aconsejable posicionar las femtoceldas de forma que se interpongan tantos muros como sea posible entre la femtocelda y las áreas de servicio ajenas.
4. Se deben posicionar las femtoceldas de forma que el aislamiento entre femtoceldas de distintas plantas sea también máximo en la mayor área posible. Sin embargo, la influencia de las femtoceldas de otras plantas es significativamente menor que la de las femtoceldas de la propia planta, por lo que esta última regla debe cumplirse solo si no se hace en detrimento de las anteriores.

La Figura 4.5 (c) ilustra la solución ASL propuesta para 5 plantas. Como puede apreciarse, esta solución, aunque cumple con la mayoría de las reglas de diseño dadas, tiene diferencias significativas con las soluciones de 1 y 2 plantas. La principal razón para que así sea es la restricción de equidad entre oficinas impuesta para el diseño de la solución final de 5 plantas. Resulta evidente que las soluciones óptimas para 1 y 2 plantas benefician al criterio de diseño en el escenario completo, en detrimento del rendimiento de algunas oficinas. Así, las oficinas 2 y 4 en la planta 1, y las oficinas 1 y 3 en la planta 2, al situarse sus femtoceldas dentro de la estancia de la esquina, presentan un rendimiento más bajo que el resto de oficinas. Se tratan éstas, por tanto, de soluciones no equitativas y, en consecuencia, que no cumplen con el criterio de equidad impuesto.

Para llegar a la solución presentada en la Figura 4.5(c), que evita llegar a una solución donde unas oficinas se favorecen respecto a otras, se han seguido las siguientes pautas:

- a) No deben situarse unas femtoceldas en el interior de las habitaciones de las esquinas del edificio y otras fuera, ya que esto produce una situación de desequilibrio en el rendimiento de la red en cada una de ellas.
- b) Deben situarse las femtoceldas de forma que se aseguren condiciones de visión directa en su área de servicio prevista (para así minimizar las pérdidas de trayecto a la celda servidora), al tiempo que se oculte de otras áreas de servicio aprovechando las esquinas de la sala (para así maximizar las pérdida de trayecto a las celdas interferentes).
- c) Para garantizar un aislamiento alto en la mayor parte del área de cobertura, y puesto que cada una de las femtoceldas ha de tener visión directa en su

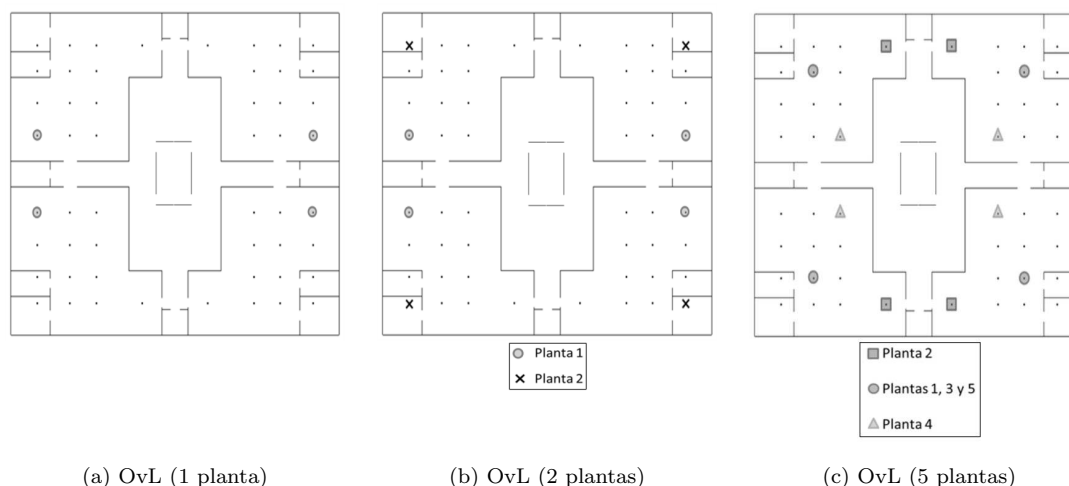


Figura 4.6: Posición de las femtoceldas que maximiza el solapamiento entre celdas.

área de servicio prevista, se propone realizar un alineamiento vertical entre las femtoceldas de distintas plantas. Esto garantiza un aislamiento constante de 17 dB ( $FL$ ).

Puesto que la posición de las femtoceldas de las oficinas 1 y 3 de la planta 1 cumplan las pautas 1) y 2), su posición equivalente en las oficinas 2 y 4 se reutiliza. Como puede verse en el plano, siguiendo este esquema, el aislamiento con 2 de las 3 femtoceldas interferentes dentro de la propia planta es muy alto, ya que la señal tiene que traspasar más de 2 muros. En el escenario de 5 plantas, este esquema de posicionamiento se replica para el resto de plantas, siguiendo la pauta 3). Más adelante, se muestra que este esquema consigue el valor más alto del indicador  $\overline{SINR}_{DL}$  en comparación con el resto de esquemas.

#### 4.3.2.4. Máximo solapamiento entre femtoceldas (OvL)

En las Figuras 4.6(a)-(c) se muestra el esquema de posicionamiento de femtoceldas que maximiza  $LDR$  (es decir, OvL) para 1, 2 y 5 plantas, respectivamente. En la Figura 4.6 (a) puede verse la solución obtenida para el escenario de 1 planta. De la figura, puede deducirse que  $LDR$  se maximiza colocando las femtoceldas de forma simétrica respecto a las zonas comunes y tan cerca entre ellas como sea posible. El posicionamiento simétrico respecto a las zonas comunes asegura que el solapamiento en estas áreas sea máximo, ya que ambas femtoceldas atraviesan los mismos obstáculos para llegar a estas zonas.

La Figura 4.6(b) muestra la solución OvL obtenida para el escenario de 2 plantas, manteniendo las femtoceldas de la primera planta en la posición obtenida para OvL de 1 planta. De nuevo, las femtoceldas de la primera y segunda planta se representan con un círculo y un aspa, respectivamente. Se observa que, como ocurre para ASL, la posición de las femtoceldas es distinta en ambas plantas. La

posición de las femtoceldas de la segunda planta sigue cumpliendo las condiciones de simetría respecto a las zonas comunes. Sin embargo, en la segunda planta se sitúan en el interior de la habitación de la esquina del edificio. Con esta ubicación, se trata de reducir el nivel de señal en partes de su propia área de servicio, con el fin de crear zonas de baja dominancia con las femtoceldas de la planta inferior, a pesar de la atenuación introducida por el forjado.

Por consiguiente, las reglas básicas deducidas de las soluciones de 1 y 2 plantas son que:

1. Las femtoceldas de una misma planta deben situarse de forma simétrica respecto a las zonas comunes.
2. Las femtoceldas de distintas plantas deben situarse tan alejadas entre sí como sea posible, de forma que, a pesar del aislamiento del forjado, aparezcan zonas en las que las femtoceldas de distintas plantas ofrezcan niveles de señal similares.

En la Figura 4.6 (c) se muestra la propuesta de solución OvL en el escenario de 5 plantas. Los círculos representan las femtoceldas de las plantas 1, 3 y 5, los cuadrados representan las femtoceldas de la planta 2 y los triángulos representan las femtoceldas de la planta 4. Como en el caso de ASL, para evitar soluciones que no traten por igual todas las oficinas, las femtoceldas no se sitúan en el interior de la habitación de la esquina. Siguiendo la primera regla, en todas las plantas, la posición de las femtoceldas es simétrica respecto a las zonas comunes, lo que maximiza el área de baja dominancia (y, con ello, el solapamiento) dentro de la propia planta. Entre distintas plantas, se colocan las femtoceldas lo más alejadas posible, tanto de las femtoceldas de su misma oficina en la planta inferior, como de las femtoceldas de su misma oficina en la planta superior. Esta es la razón por la que se alternan las femtoceldas entre plantas consecutivas, tal como se aprecia en la figura.

#### 4.3.2.5. Comparación del rendimiento de los esquemas de posicionamiento

A continuación se evalúa el rendimiento de cada uno de los esquemas de posicionamiento diseñados para el escenario de 5 plantas. Con ello, se pretende validar las reglas de diseño para cada uno de los criterios, comprobando que los escenarios obtenidos con ellas cumplen con el propósito para el que fueron diseñados. La Tabla 4.1 compara el rendimiento de todos los esquemas construidos en el escenario de 5 plantas (CL, WSL, ASL y OvL). Como referencia de comparación, se incluye el esquema original (nombrado OrL, de *Original Layout*) utilizado en el Capítulo 3, que se muestra en la Figura A.2. Para cada uno de los esquemas, se presenta el valor de los indicadores  $\overline{PL}$ ,  $L_{10\%,DL}SINR$ ,  $\overline{SINR}_{DL}$  y  $LDR$ .

Como cabe esperar, los esquemas CL, WSL, ASL y OvL consiguen el mejor valor para el indicador para el que fueron diseñados (resaltado en negrita en la tabla).



Tabla 4.1: Rendimiento de los distintos esquemas de posicionamiento en 5 plantas.

Esquema	$\overline{PL}$ [dB]	$L_{10\%,SINRDL}$ [dB]	$\overline{SINR}_{DL}$ [dB]	$LDR$ [%]
OrL	60.50	0.92	7.98	14.41
CL	<b>59.29</b>	0.83	8.99	11.95
WSL	62.52	<b>2.70</b>	8.99	6.48
ASL	59.39	0.74	<b>9.01</b>	13.03
OvL	60.84	-1.25	7.27	<b>21.23</b>

El esquema original, OrL, muestra valores intermedios de todos los indicadores, pudiendo considerarse como una solución de compromiso entre los criterios de cobertura y calidad del enlace radio. En particular,  $L_{10\%,DLSINR}$  y  $\overline{SINR}_{DL}$  son 1.7 dB y 1 dB menores que los mejores resultados obtenidos por WSL y ASL, respectivamente. Además,  $\overline{PL}$  de OrL es 1.21 dB mayor que el mejor resultado, obtenido por CL. Igualmente, es el método que obtiene el mayor valor de  $LDR$ , exceptuando el del escenario OvL.

Por su parte, CL presenta el valor más bajo de  $\overline{PL}$  (59.29 dB), pero, en cambio, presenta valores bajos de los indicadores  $L_{10\%,DLSINR}$  y  $LDR$ . Por el contrario, WSL presenta un valor muy alto de  $L_{10\%,DLSINR}$  (2.70 dB), a costa de obtener valores mucho peores de  $\overline{PL}$  y  $LDR$ . En el caso de ASL, presenta el mejor valor de  $\overline{SINR}_{DL}$  (9.01 dB), a pesar de que se descartó una solución mejor para mantener la equidad entre oficinas. Como contrapartida, ASL obtiene un valor bajo de  $L_{10\%,DLSINR}$ . Por último, OvL consigue un valor mucho mayor de  $LDR$  que el resto (21.23%), a expensas de deteriorar el resto de indicadores. Específicamente,  $LDR$  es un 50% más alto que en OrL, que es el segundo mejor esquema en términos de solapamiento. Sin embargo,  $\overline{PL}$ ,  $L_{10\%,DLSINR}$  y  $\overline{SINR}_{DL}$  en OvL son 1.5 dB, 4 dB y 1.7 dB peores que el mejor valor obtenido por CL, WSL y ASL, respectivamente.

## 4.4. Pruebas

En las secciones anteriores se describen diversas estrategias de posicionamiento de femtoceldas para optimizar distintos indicadores globales de rendimiento. Cada una de las estrategias ha dado lugar a un esquema de posicionamiento de femtoceldas en un edificio que optimiza un determinado indicador de cobertura, interferencia o solapamiento. En esta sección se presentan las pruebas para comprobar la influencia del posicionamiento de las femtoceldas en las técnicas de reparto de tráfico presentadas en el Capítulo 3. Con ello, se pretende validar la estrategia de posicionamiento de femtoceldas que maximiza la tasa de baja dominancia, comprobando si dicha estrategia mejora la capacidad de alivio de congestión de las técnicas de reparto de tráfico. Aprovechando el indicador de solapamiento propuesto, se muestra cómo las técnicas de reparto que modifican la potencia de transmisión afectan al solapamiento entre celdas, y, con ello, a la capacidad de repartir tráfico mediante el traspaso.

A continuación se presenta la metodología experimental, describiendo cada uno de los experimentos realizados. Posteriormente se analizan los resultados obtenidos.

#### 4.4.1. Metodología experimental

Los experimentos de esta sección se realizan sobre el mismo simulador dinámico que se utilizó para validar las técnicas de reparto de tráfico en el Capítulo 3, descrito en el Anexo A. El escenario consta de un emplazamiento macrocelular con 3 sectores, en cuya área de cobertura se sitúa un edificio de oficinas con 5 plantas y 4 femtoceldas por planta. La distribución espacial de usuarios es uniforme en las macroceldas, mientras que en el interior del edificio es uniforme o no uniforme dependiendo del experimento. En el caso de tráfico no uniforme, algunas femtoceldas presentan graves problemas de congestión.

Se realizan tres experimentos distintos. En el primero de ellos (experimento B1), se simulan los diferentes esquemas de posicionamiento de femtoceldas propuestos en el Capítulo 4 en condiciones de tráfico uniforme con los parámetros de red configurados por defecto. Con ello, se pretende identificar la mejor estrategia de posicionamiento de femtoceldas cuando no existen problemas de congestión en la red, provocados por una distribución de usuarios irregular. En el segundo experimento (B2), se simulan los mismos esquemas de posicionamiento, pero con distribución de tráfico no uniforme. Para solventar los problemas de congestión que aparecen, se ejecutan varios lazos de optimización de la técnica de reparto de tráfico mediante traspaso (MTSFC). Con ello, se trata de identificar el esquema de posicionamiento que consigue un mayor alivio de congestión. En el último de los experimentos (B3), se simula la técnica de reparto de tráfico mediante potencia (CTS) con el esquema de posicionamiento original, centrando el estudio en la evolución del indicador de solapamiento. Con ello, se pretende mostrar que ajustando la potencia de transmisión se puede cambiar las condiciones de solapamiento entre celdas, y, con ello, la capacidad de repartir tráfico mediante el traspaso. A continuación se detallan los parámetros de las distintas simulaciones.

##### 4.4.1.1. Experimento B1: Esquemas de posicionamiento sin reparto de tráfico

En este primer experimento, los 5 esquemas de posicionamiento de femtoceldas descritos en la Sección 4.3.2 (OrL, CL, WSL, ASL y OvL) se simulan con una distribución de usuarios uniforme en el escenario. El objetivo es evaluar el rendimiento de cada uno de ellos en un escenario limitado por interferencia con tráfico uniforme, donde, por tanto, no conviene repartir tráfico entre femtoceldas vecinas. Con este propósito, la población de usuarios se configura de forma que la tasa de ocupación media de PRB sea aproximadamente del 50% para todas las femtoceldas. Este porcentaje de utilización de PRB en todas las femtoceldas es lo suficientemente elevado para producir un alto nivel de interferencia.

Como no es preciso repartir tráfico entre celdas, se simula un único lazo de optimización, de 1 hora de tiempo de red, con cada uno de los esquemas de posicionamiento propuestos. En dicho lazo, los márgenes de traspaso y la potencia de transmisión de las femtoceldas se configuran a sus valores por defecto (en este trabajo, -3 dB y potencia máxima).

#### 4.4.1.2. Experimento B2: Reparto de tráfico mediante traspaso con distintos esquemas de posicionamiento

En este segundo experimento, se evalúa el rendimiento de la técnica de reparto de tráfico MTSFC para los 5 esquemas de posicionamiento de femtoceldas con tráfico no uniforme. El objetivo es identificar la estrategia de posicionamiento que más favorece el reparto de tráfico. Las pruebas demostrarán que la estrategia que es óptima para tráfico uniforme deja de serlo para tráfico no uniforme. Por este motivo, se trata de cuantificar el grado de no uniformidad a partir del cual la estrategia óptima de posicionamiento cambia. Para ello, se realiza una extensa campaña de simulaciones en la que las estrategias de posicionamiento se prueban con una distribución espacial de usuarios que varía desde una distribución uniforme hasta una distribución extremadamente irregular.

Las distribuciones de usuarios no uniformes se construyen mediante una media ponderada de las distribuciones de dos casos extremos. El primer escenario extremo, al que se nombra como escenario regular, es la distribución de usuarios utilizada en el experimento B1, donde la carga de todas las femtoceldas es la misma. El segundo escenario extremo, al que se nombra escenario irregular, se trata de la distribución de usuarios utilizada para validar las técnicas de reparto de tráfico en el experimento A3. Esta distribución presenta las siguientes características:

- a) La mayoría de los usuarios se concentra en una de las oficinas, lo que causa graves problemas de congestión en su correspondiente femtocelda y, por tanto, hace necesario el uso de una técnica de reparto de tráfico para aliviar la congestión.
- b) El resto de usuarios se concentran en las oficinas adyacentes a dicha oficina, tanto en las oficinas de la misma planta como en las plantas inmediatamente superior e inferior. Este hecho dificulta el reparto de tráfico con las celdas vecinas, además de incrementar los niveles de interferencia.

De forma cuantitativa, en este caso peor, el 87 % de los usuarios comienzan sus conexiones en una de las oficinas de la planta central, el 12 % lo hace en el resto de oficinas de la planta central, y el 1 % restante lo hace en el resto de plantas. Con esta distribución de tráfico y con la configuración por defecto de los parámetros, la carga de las femtoceldas varía desde menos de un 1 % de utilización de PRB (femtoceldas de las plantas 1 y 5) hasta un 85 % (femtocelda de la oficina 3 en la planta central).

Una vez definidos los dos casos extremos, el número total de usuarios para las distribuciones intermedias se define como

$$N_{intermedio} = (1 - x) \cdot N_{regular} + x \cdot N_{irregular} , \quad (4.7)$$

donde  $N_{intermedio}$  es el número total de usuarios para el escenario intermedio,  $N_{regular}$  y  $N_{irregular}$  son el número total de usuarios en el escenario regular e irregular, respectivamente, y  $x$  es el peso que indica cómo de irregular es la distribución, siendo  $x = 0$  para el escenario regular del experimento B1 y  $x = 1$  para el escenario irregular del experimento A3 (caso peor). Asimismo, se define la probabilidad de que un usuario comience su conexión en una oficina  $i$  como

$$P_{intermedio}(i) = (1 - x) \cdot P_{regular}(i) + x \cdot P_{irregular}(i) , \quad (4.8)$$

donde  $P_{intermedio}(i)$  es la probabilidad de que un usuario inicie su conexión en la oficina  $i$  en el escenario intermedio, y  $P_{regular}(i)$  y  $P_{irregular}(i)$  son la probabilidad de que un usuario inicie su conexión en la oficina  $i$  en el escenario regular e irregular, respectivamente. En las pruebas, se comparan los resultados de 11 distribuciones espaciales de usuarios, correspondientes al caso uniforme ( $x = 0$ ), no uniforme ( $x = 1$ ) y 9 casos intermedios ( $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ). Para cada distribución de usuario, se simulan 25 lazos de optimización de la técnica de reparto de tráfico MTSFC con los 5 esquemas de posicionamiento (OrL, CL, WSL, ASL y OvL).

#### 4.4.1.3. Experimento B3: Reparto de tráfico mediante potencia con esquema de posicionamiento original

Habiendo identificado que los esquemas de posicionamiento con un indicador de solapamiento alto son los que presentan una mayor capacidad de reparto de tráfico, en este tercer experimento se estudia cómo el solapamiento en una red puede alterarse ajustando la potencia de transmisión de las femtoceldas. Téngase en cuenta que, en una red ya desplegada, la ubicación de las femtoceldas podría no haberse realizado siguiendo criterios de solapamiento. En estas condiciones, cualquier técnica de reparto de tráfico que, durante la fase de operación, permita modificar de forma flexible el solapamiento entre celdas es extremadamente útil. En este sentido, cabe recordar que la técnica MTSFC no modifica el solapamiento entre femtoceldas, por lo que su capacidad de reparto de tráfico está limitada por el esquema de posicionamiento de femtoceldas elegido en la fase de despliegue. PTS, por el contrario, modifica la potencia de transmisión de las femtoceldas, lo que afecta directamente a las condiciones de solapamiento entre celdas y, en consecuencia, a la capacidad de reparto de tráfico de MTSFC con una disposición de femtoceldas dada. Es por esto que, utilizando MTSFC y PTS de forma combinada (como en CTS) pueden superarse las limitaciones de ambas técnicas, mejorando así los resultados obtenidos por estas técnicas de forma separada.

Para estudiar el impacto del solapamiento en estas técnicas, y el impacto de éstas sobre el indicador de solapamiento basado en la tasa de baja dominancia,  $LDR$ , se simulan 50 lazos de optimización de la técnica CTS (combinación de MTSFC y PTS). En las pruebas, la distribución espacial de usuarios es no uniforme, correspondiendo al caso peor ( $x = 1$ , según el experimento B2). Las femtoceldas se disponen en las esquinas interiores de cada oficina, como en el escenario de referencia descrito en la Sección 4.3.2 (solución OrL). Como se mostró en la Tabla 4.1, este esquema de posicionamiento de femtoceldas OrL no es el que mayor solapamiento entre celdas presenta. Con esta configuración, se pretende mostrar cómo se puede mejorar la efectividad del reparto de tráfico en un escenario ya desplegado con la técnica PTS.

Al igual que en el capítulo anterior, en todos los experimentos, se mide el rendimiento global de la red a través de la tasas de usuarios insatisfechos,  $UUR$ , llamadas bloqueadas,  $BR$ , y pérdida de conexión,  $OR$ . Todos estos indicadores se calculan al final de cada lazo de optimización para poder analizar la trayectoria del proceso de ajuste de parámetros. Como en anteriores experimentos, se desactiva el mecanismo de caída de llamada.

## 4.4.2. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los experimentos B1, B2 y B3, en los que se analiza la influencia de las estrategias de posicionamiento de femtocelda en las técnicas de reparto de tráfico.

### 4.4.2.1. Experimento B1: Esquemas de posicionamiento sin reparto de tráfico

La Tabla 4.2 muestra los valores de  $BR$ ,  $OR$  y  $UUR$  para los distintos esquemas de posicionamiento de femtoceldas con una distribución de usuarios uniforme y los parámetros de red configurados por defecto. En la última columna puede apreciarse que los valores más bajos de  $UUR$  se obtienen para el esquema de posicionamiento original (OrL) y el construido en base a criterios de cobertura (CL). Como se infiere de la tercera columna, esto es debido principalmente al bajo valor de  $OR$  obtenido con estas configuraciones. WSL y ASL presentan un rendimiento ligeramente peor con esta distribución de tráfico, aunque las diferencias no son significativas.

Por el contrario, OvL es el esquema que obtiene peores resultados, tanto de  $UUR$ , como de  $OR$  y  $BR$ . Esto es debido a que un alto valor de solapamiento entre celdas produce niveles altos de interferencia, lo que degrada la calidad de la señal. Dicha degradación se traduce en un incremento de  $OR$ . Además, el deterioro de la calidad de señal provoca que se haga uso de esquemas de modulación y codificación más robustos, que implican un uso menos eficiente de los recursos. Esta pérdida de eficiencia espectral se traduce en una mayor tasa de ocupación de la red, que se refleja en un incremento de  $BR$ . Como resultado de ambos deterioros, se incrementa  $UUR$ .

Tabla 4.2: Rendimiento de la red con distribución de tráfico uniforme.

Escenario	$BR$ [%]	$OR$ [%]	$UUR$ [%]
OrL (original)	0.08	0.41	0.49
CL (mínimas pérdidas de propagación)	0.02	0.49	0.51
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	0.13	0.67	0.79
ASL (máxima $SINR$ media)	0.04	0.68	0.72
OvL (máximo solapamiento)	0.44	2.32	2.74

Tabla 4.3: Rendimiento de la red con distribución de tráfico no uniforme.

Escenario	$UUR^{(1)}$ [%]	$UUR^{(25)}$ [%]	$\Delta UUR_r$ [%]
OrL (original)	17.20	12.30	28.48
CL (mínimas pérdidas de propagación)	15.55	10.55	32.14
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	18.18	12.86	29.27
ASL (máxima $SINR$ media)	17.68	12.45	29.54
OvL (máximo solapamiento)	14.00	5.67	59.49

Puede concluirse así que, cuando la distribución de usuarios es uniforme, los esquemas de posicionamiento de femtoceldas diseñados para maximizar el solapamiento presentan un peor rendimiento que aquellos diseñados para optimizar indicadores de cobertura o  $SINR$ .

#### 4.4.2.2. Experimento B2: Reparto de tráfico mediante traspaso con distintos esquemas de posicionamiento

Cuando se evalúan los esquemas de posicionamiento de femtoceldas con tráfico no uniforme, los resultados cambian drásticamente. La Tabla 4.3 presenta los valores de  $UUR$  obtenidos por MTSFC con los esquemas de posicionamiento de femtoceldas propuestos en la Sección 4.3.2, para la distribución espacial de usuarios más irregular. En concreto, se presentan los valores de  $UUR$  después del primer lazo de optimización (configuración inicial),  $UUR^{(1)}$ , y tras 25 lazos de optimización (configuración optimizada tras el proceso de ajuste parámetros),  $UUR^{(25)}$ . Para cuantificar la mejora conseguida tras el proceso de reparto de tráfico, una tercera columna muestra la mejora relativa de  $UUR$ ,  $\Delta UUR_r$ , calculada como

$$\Delta UUR_r = \frac{UUR^{(1)} - UUR^{(25)}}{UUR^{(1)}}. \quad (4.9)$$

Comparando los valores de  $UUR$  de la Tabla 4.3 con los del Tabla 4.2, se concluye que el rendimiento de la red es sensiblemente peor cuando el tráfico se distribuye de forma irregular. De la segunda columna, que muestra el valor de  $UUR$  con la configuración de parámetros por defecto, se deduce que, al contrario de lo que ocurre con tráfico uniforme, con tráfico no uniforme, OvL consigue el mejor rendimiento de la red incluso cuando el proceso de reparto de tráfico no

ha comenzado. Más específicamente,  $UUR^{(1)} = 14\%$  para OvL, mientras que  $UUR^{(1)} = 15.55\%$  para el mejor del resto de los esquemas (en esta situación, OrL). Aún más importante es el hecho de que, tras el proceso de optimización con MTSFC, el esquema OvL presenta valores de  $UUR$  significativamente más bajos que el resto de esquemas. En particular,  $UUR^{(25)} = 5.67\%$  para OvL, que es casi la mitad de lo conseguido por MTSFC con el mejor del resto de esquemas (en este caso,  $10.55\%$  para CL). De estos resultados, puede concluirse que el rendimiento global del esquema OvL es superior al del resto de esquemas, ya que, aunque OvL es ligeramente peor cuando el tráfico es uniforme, los resultados con una distribución de tráfico irregular son significativamente mejores.

Hasta este momento, se han presentado los resultados de MTSFC con los distintos esquemas de posicionamiento con tráfico uniforme ( $x = 0$ , Tabla 4.2) y no uniforme extremo ( $x = 1$ , Tabla 4.3). Para conocer a partir de qué grado de no uniformidad en la distribución espacial de usuarios el esquema de posicionamiento OvL supera al resto de esquemas, se repiten las simulaciones con distribuciones de usuarios intermedias entre el caso uniforme y el caso no uniforme extremo. En la Tabla 4.4 se muestran los resultados de los distintas esquemas de posicionamiento con dichas distribuciones, donde  $x$  representa el grado de no uniformidad (p.ej.,  $x = 0.1$  corresponde a una distribución casi uniforme, mientras que  $x = 0.9$  corresponde a una distribución muy irregular). De esta manera, las distribuciones de usuario más irregulares se presentan en la parte de abajo de la tabla.

En un primer examen de los resultados, se comprueba que OvL obtiene rápidamente resultados mejores que el resto de esquemas de posicionamiento conforme crece el valor de  $x$ . Así, para  $x = 0.1$ , se observa que, aunque OvL es el peor esquema (como ocurría en el caso uniforme), su valor de  $UUR^{(25)}$  está ahora muy cerca de los obtenidos por el resto de esquemas. Para  $x = 0.2$ , sólo el esquema CL, con  $UUR^{(25)} = 2.37$ , presenta mejores resultados que el esquema OvL, con el que  $UUR^{(25)} = 2.82$ . Para  $x = 0.3$ , el esquema OvL ya es el que presenta menor  $UUR$  tras el proceso de optimización, con  $UUR^{(25)} = 9.04$ , y esta diferencia con el resto de esquemas crece aún más cuando aumenta el valor de  $x$ .

La misma tendencia se aprecia en los valores de incremento relativos de  $UUR$  mostrados en la cuarta columna. Con  $x = 0.2$ , OvL ya es el esquema que realiza un reparto de tráfico más efectivo, reduciendo  $UUR$  en un  $34.87\%$ . Dicha superioridad se hace más evidente conforme aumenta el valor de  $x$ .

Para completar el estudio, en la Figura 4.7 se muestra el valor de  $UUR$  al final del proceso de optimización para las diferentes distribuciones de tráfico y esquemas de posicionamiento incluyendo las distribuciones de tráfico extremas,  $x = 0$  y  $x = 1$ . Se aprecia claramente cómo, a partir de  $x = 0.2$ , el esquema que distribuye las femtoceldas para maximizar el solapamiento obtiene mejor rendimiento de red, alcanzándose mejoras de hasta un  $4.9\%$  de  $UUR$  para  $x = 1$ .

Estos resultados son una clara evidencia de la superioridad de la estrategia de posicionamiento de femtoceldas que trata de maximizar el solapamiento, frente a la optimización de otros indicadores, cuando la distribución de tráfico deja de ser uniforme, incluso aunque el grado de no uniformidad en la distribución espacial de

Tabla 4.4: Rendimiento de la red con distintas distribuciones espaciales de usuarios.

Escenario	$UUR^{(1)}$ [%]	$UUR^{(25)}$ [%]	$\Delta UUR_r$ [%]	$x$
OrL (original)	2.99	2.13	28.76	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	1.97	1.33	32.49	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	2.58	2.23	13.57	0.1
ASL (máxima $SINR$ media)	2.23	1.48	33.63	
OvL (máximo solapamiento)	3.25	2.66	18.15	
OrL (original)	4.44	3.32	25.23	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	3.53	2.37	32.86	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	4.02	3.36	16.42	0.2
ASL (máxima $SINR$ media)	3.67	2.96	19.35	
OvL (máximo solapamiento)	4.33	2.82	34.87	
OrL (original)	11.36	10.78	5.11	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	10.56	9.49	10.13	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	11.06	10.49	5.15	0.3
ASL (máxima $SINR$ media)	11.61	10.55	9.13	
OvL (máximo solapamiento)	11.52	9.04	21.53	
OrL (original)	16.47	13.87	15.79	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	15.05	12.13	19.40	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	16.36	14.21	13.14	0.4
ASL (máxima $SINR$ media)	15.65	12.90	17.57	
OvL (máximo solapamiento)	15.41	10.91	29.20	
OrL (original)	21.66	19.41	10.39	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	20.27	17.89	11.74	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	21.62	19.81	8.37	0.5
ASL (máxima $SINR$ media)	21.49	19.01	11.54	
OvL (máximo solapamiento)	20.67	16.34	20.95	
OrL (original)	24.58	23.20	5.61	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	22.80	21.76	4.56	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	25.19	24.28	3.61	0.6
ASL (máxima $SINR$ media)	24.48	22.96	6.21	
OvL (máximo solapamiento)	22.96	20.37	11.28	
OrL (original)	27.78	23.92	13.89	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	25.57	22.30	12.79	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	26.79	24.76	7.58	0.7
ASL (máxima $SINR$ media)	27.29	23.18	15.06	
OvL (máximo solapamiento)	25.31	18.18	28.17	
OrL (original)	25.56	22.62	11.50	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	24.18	21.76	10.01	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	25.33	24.38	3.75	0.8
ASL (máxima $SINR$ media)	25.03	22.76	9.07	
OvL (máximo solapamiento)	23.02	17.55	23.76	
OrL (original)	25.32	20.83	17.73	
CL (mínimas pérdidas de propagación)	22.89	18.83	17.74	
WSL (máximo percentil 10 % de SINR)	25.37	22.64	10.76	0.9
ASL (máxima $SINR$ media)	25.02	20.70	17.27	
OvL (máximo solapamiento)	21.92	13.92	36.50	

usuarios sea relativamente baja. Cabe destacar la importancia de este resultado, ya que, en una red real, la distribución espacial de tráfico difícilmente es uniforme, especialmente en el caso de redes de femtoceldas, donde el proceso de planificación rara vez tiene en cuenta la demanda de tráfico.

#### 4.4.2.3. Experimento B3: Reparto de tráfico mediante potencia con esquema de posicionamiento original

Una vez se ha demostrado que el solapamiento entre celdas es beneficioso para resolver problemas de congestión en interiores, se investigan aquellas técni-



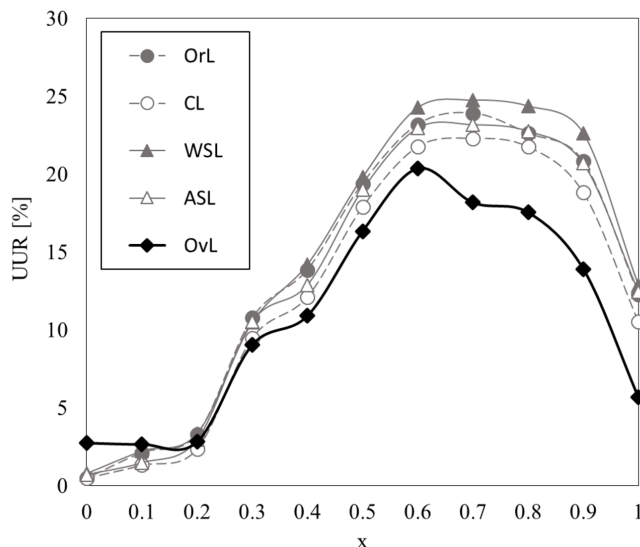


Figura 4.7: Tasa de usuarios insatisfechos con distintos esquemas de posicionamiento y distribuciones espaciales de usuarios.

cas de reparto de tráfico que modifican el solapamiento sobre un esquema de posicionamiento que ya existe. Como se ha señalado, MTSFC no modifica el solapamiento entre celdas. Sin embargo, PTS (y, por tanto, CTS) sí cambia el solapamiento, al cambiar la potencia de transmisión de las femtoceldas. Estos cambios en el área de servicio, cuando sirven para aumentar las zonas de baja dominancia, pueden ayudar a salvar las limitaciones del reparto de tráfico en un determinado esquema de posicionamiento de femtoceldas. Para comprobar la mejora del reparto de tráfico con PTS, se simula la técnica CTS sobre el esquema OrL con una distribución de tráfico irregular ( $x = 1$ ). En la Figura 4.8 se muestran las evoluciones de  $UUR$  (eje primario) y el indicador de solapamiento  $LDR$  (eje secundario) durante 25 y 50 iteraciones de MTSFC y CTS, respectivamente. Para simplificar el análisis, se muestran solo los indicadores en la femtocelda sobrecargada (femtocelda 9 del escenario del experimento A3), puesto que es en esta femtocelda donde la capacidad de reparto de tráfico tiene un mayor impacto sobre el rendimiento global de la red.

En la figura, se observa que la técnica MTSFC se estanca tras 5 lazos de optimización, cuando  $UUR^{(5)} = 12\%$ . De un análisis más detallado se desprende que la técnica MTSFC no es capaz de reducir más el valor de  $UUR$  una vez que los usuarios de la femtocelda congestionada situados en las áreas de solapamiento han sido enviados hacia femtoceldas vecinas. Cuando la técnica utilizada es MTSFC, estas áreas solapadas son menores, y no cambian, como puede deducirse del indicador de solapamiento. Se observa cómo  $LDR = 5\%$  durante todo el proceso de optimización, confirmando que MTSFC no afecta al solapamiento entre celdas. Esta es la razón por la que MTSFC tiene una capacidad de reparto de tráfico limitada sobre el esquema OrL.

Por el contrario, CTS (es decir, la combinación de MTSFC y PTS) reduce

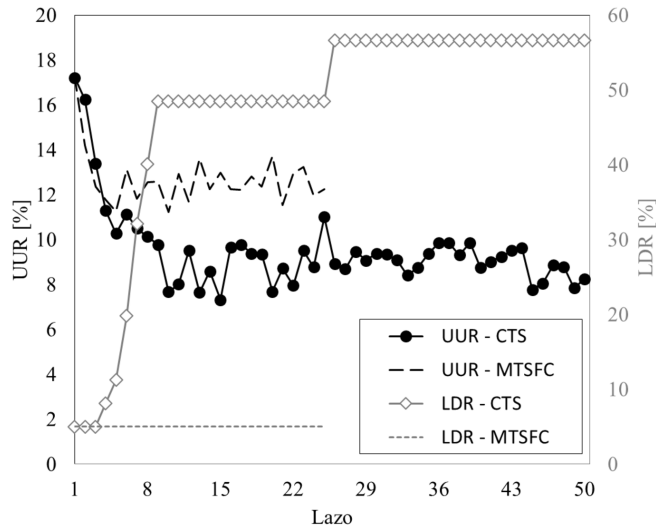


Figura 4.8: Tasas de usuarios insatisfechos y baja dominancia para la femtocelda más cargada con distintas técnicas de reparto de tráfico en el escenario original.

*UUR* desde un 17.2% hasta un 8%. En CTS, los cambios de  $P_{TX}$  llevados a cabo por PTS (lazos 5, 6, 7 y 27) incrementan *LDR* desde un 5% hasta un 57%. Los incrementos de *LDR* en estos lazos coinciden con los lazos donde actúa PTS, una vez que que MTSFC no propone ningún cambio. Así, CTS, a través de PTS, crea nuevas áreas de solapamiento en el esquema OrL, donde es posible repartir el tráfico entre la femtocelda congestionada y sus femtoceldas vecinas. Por tanto, en la técnica combinada CTS, PTS aumenta la capacidad de reparto de tráfico de MTSFC, potenciando el alivio de congestión conseguido.

Conviene precisar que, aunque en el experimento realizado PTS agranda el área de solapamiento, esto no tiene por qué ser siempre así. El objetivo de PTS es desplazar la frontera entre una femtocelda y sus adyacentes, desplazando con ello la zona de solapamiento entre ellas. Así, el área de esta nueva zona de solapamiento no es necesariamente mayor que la anterior. Para estudiar en qué situación PTS aumenta el solapamiento entre celdas, los cambios producidos por el ajuste de potencia en una femtocelda congestionada se desglosan en dos efectos:

1. por un lado, se reduce el área de solapamiento en la celda congestionada porque, de la zona del área de servicio que presenta baja dominancia con sus celdas vecinas, se desprende una fracción que pasa a formar parte del área de servicio de estas últimas;
2. por otro lado, se incrementa el área de solapamiento en la celda congestionada porque, al reducir su potencia de transmisión, aparecen nuevas zonas en su área de servicio donde la dominancia es baja.

Cuando el segundo de los efectos domina frente al primero, el indicador de solapamiento *LDR* aumenta tras aplicar PTS, como ocurre en el experimento

realizado. Por el contrario, cuando el primero de los efectos domina frente al segundo, el indicador de solapamiento  $LDR$  decrece. No obstante, cabe destacar que, aunque  $LDR$  se reduzca tras PTS, el área de solapamiento perdida pasa a pertenecer a femtoceldas adyacentes. Este resultado se traduce en un reparto de tráfico, al que hay que sumar la nueva área de solapamiento sobre la que podrá actuar de nuevo MTSFC. Por ello, tras una iteración de PTS, el trasvase de tráfico desde la femtocelda congestionada a sus vecinas siempre será positivo, sea cual sea el nuevo valor de  $LDR$ . Este último valor reflejará el beneficio de aplicar MTSFC en posteriores lazos de optimización.

## 4.5. Conclusiones

En este capítulo se han presentado varias estrategias de posicionamiento de femtoceldas LTE para escenarios de interior. Como principal aportación, se ha presentado una nueva estrategia para posicionar las femtoceldas que aumenta el solapamiento entre femtoceldas vecinas para mejorar la eficacia de las técnicas de reparto de tráfico con el traspaso.

Un estudio preliminar sobre un simulador estático ha permitido definir una serie de pautas para definir los emplazamientos de la femtoceldas en un edificio, de modo que maximicen distintos criterios de rendimiento de red. Entre estos criterios, se ha propuesto un nuevo indicador que cuantifica el solapamiento entre las femtoceldas, basado en el tamaño de las áreas de baja dominancia. Haciendo uso de este conjunto de reglas, el operador de red puede encontrar la mejor disposición de la femtoceldas según un determinado criterio, sin necesidad de realizar cálculos complejos o utilizar herramientas de planificación sofisticadas.

La utilidad de estas reglas ha quedado demostrada con la obtención de un esquema de posicionamiento en el escenario considerado para cada uno de los criterios definidos. Cada uno de estos esquemas de posicionamiento ha obtenido el valor máximo del indicador de rendimiento para el que fue diseñado. Posteriormente, haciendo uso del simulador descrito en el Anexo A, se ha realizado un análisis del rendimiento de la técnica de balance de tráfico mediante traspaso sobre cada uno de estos esquemas.

Los resultados han mostrado que, cuando la distribución de tráfico es uniforme, el esquema diseñado para maximizar el solapamiento presenta el peor rendimiento en términos de tasa de usuarios insatisfechos. Específicamente, con esta estrategia, se ha obtenido un valor cuatro veces mayor de los indicadores de las tasa de bloqueo de llamadas y pérdida de conexión que el obtenido cuando las femtoceldas se posicionan para optimizar los criterios de cobertura o calidad de conexión. Sin embargo, cuando la distribución de usuarios no es uniforme, el esquema diseñado para maximizar el solapamiento entre femtoceldas obtiene el mejor rendimiento una vez que el proceso de reparto de tráfico se ha llevado a cabo. En el caso más extremo de la distribución de usuarios no uniforme, la tasa de usuarios insatisfechos medida tras el reparto de tráfico mediante modificación de márgenes de traspaso,

en el esquema de posicionamiento basado en solapamiento, es un 40 % menor que en el mejor de los otros esquemas de posicionamiento.

El esquema de posicionamiento que maximiza solapamiento no solo consigue mejores resultados para distribuciones de tráfico extremadamente irregulares. Los resultados obtenidos demuestran que en escenarios con una distribución de tráfico no tan irregular, el rendimiento conseguido por este esquema de posicionamiento es mejor que para el resto de esquemas. Así, para  $x > 0.2$  (donde  $x = 0$  corresponde a una distribución uniforme y  $x = 1$  corresponde a la distribución extremadamente irregular de los experimentos del capítulo anterior), el rendimiento de este esquema de posicionamiento es siempre mayor que el obtenido para el resto de esquemas. Más específicamente, para valores de  $x$  superiores a 0.6, la tasa de usuarios insatisfechos tras el reparto de tráfico mediante modificación de márgenes de traspaso es siempre, al menos, un 5 % menor para el escenario original que para el mejor de los otros esquemas.

Por último, los resultados de los experimentos han mostrado que ajustar la potencia de transmisión de las femtoceldas para modificar las áreas de dominancia de las mismas, ayuda a mejorar el rendimiento de las técnicas de reparto de tráfico mediante modificación de márgenes de traspaso. En el escenario estudiado, el ajuste de la potencia de las femtoceldas ha permitido aumentar por diez el tamaño del área de solapamiento entre celdas, lo que potencia la capacidad de reparto de tráfico mediante modificación de márgenes de traspaso. Este comportamiento justifica el uso conjunto de las técnicas que modifican la potencia de transmisión de las celdas y los márgenes de traspaso para distribuir tráfico en redes de femtoceldas LTE.



## Capítulo 5

# Conclusiones

En este capítulo de cierre se presentan las principales conclusiones de esta tesis. La Sección 5.1 resume las contribuciones más relevantes del trabajo. La Sección 5.2 presenta diferentes líneas de continuación del trabajo aquí presentado. Por último, en la Sección 5.3 se enumera la lista de publicaciones generadas durante el desarrollo de esta tesis.

### 5.1. Principales contribuciones

En los últimos años, la proliferación de teléfonos inteligentes y tabletas ha provocado un incremento exponencial de la demanda de servicios en movilidad. Esta tendencia ha acelerado el despliegue de la tecnología LTE, incrementando la complejidad de las redes móviles, que se ha convertido en uno de los principales cuellos de botella que frena el éxito de las nuevas tecnologías de acceso radio. Esta complejidad aumenta con la instalación de redes de femtoceldas para mejorar el servicio en interiores. Con ello, ha crecido el interés de los operadores en todas aquellas técnicas que permitan automatizar las tareas de gestión de la red.

En los escenarios de interior, la imposibilidad de realizar un proceso de planificación cuidadoso hace que aparezcan con cierta frecuencia problemas de congestión. Estos problemas, analizados ampliamente en redes de macroceldas, aparecen ahora en entornos de oficinas, que presentan características distintas a los entornos de macrocelda, y que hacen necesaria la búsqueda de nuevas soluciones. Además, en el caso de las femtoceldas, a diferencia de las estaciones base convencionales, la ausencia de un operario que monitorice su rendimiento y ajuste sus parámetros a los cambios del entorno, hacen que el diseño de técnicas de redes autoorganizadas sea de gran interés.

En esta tesis se ha realizado un profundo trabajo de búsqueda, análisis y experimentación de soluciones para el problema de la congestión en redes corporativas de femtoceldas LTE. Es en estos entornos, donde el esquema de acceso abierto permite el reparto de tráfico entre los distintos elementos de la red.

El trabajo se ha iniciado con un estudio de la tecnología LTE, las redes de femtoceldas y las técnicas SON aplicadas a este tipo de redes. El análisis del estado de la investigación y la tecnología ha mostrado que los trabajos en este ámbito se han centrado en el uso de femtoceldas en entornos residenciales, donde las femtoceldas se configuran con acceso cerrado, y, por tanto, el reparto de tráfico no es posible. Por este motivo, no existen estudios relevantes sobre el reparto de tráfico en femtoceldas.

Como parte de la formulación del problema, se ha presentado un experimento de balance de carga en una red comercial LTE. El análisis de esta prueba de campo ha servido para señalar las limitaciones de las técnicas de reparto de tráfico basadas en el traspaso. Estas limitaciones, propias de LTE, han resaltado la necesidad de realizar la modificación de márgenes de traspaso con extremada precaución, para así evitar una degradación excesiva de los indicadores de calidad de señal de la red.

Posteriormente se han diseñado varias técnicas de reparto de tráfico para redes de femtoceldas LTE corporativas. Las técnicas propuestas permiten aliviar los problemas de congestión distribuyendo la demanda de tráfico entre femtoceldas vecinas. Con este objetivo, los métodos descritos modifican las áreas de servicio de las celdas de interior ajustando los márgenes de traspaso y/o las potencias de transmisión de las femtoceldas, de forma que parte del tráfico de las femtoceldas más cargadas se desplace hacia femtoceldas vecinas. Para contrarrestar las limitaciones del balance de carga en LTE, se han añadido diversas restricciones que limitan la degradación de la calidad de conexión causada por el reparto de tráfico. Estas restricciones pueden ser fijas o adaptarse a las condiciones de cada adyacencia mediante el análisis de trazas de conexión, para lo que se ha diseñado un nuevo indicador ( $\overline{SINR}_{HO}$ ). Para simplificar su especificación, los métodos se han desarrollado mediante controladores de lógica difusa, que pueden combinarse para potenciar sus efectos.

Los métodos de reparto de tráfico propuestos se han validado en un simulador de femtoceldas LTE de nivel de sistema desarrollado específicamente en esta tesis. Con esta campaña de simulaciones, se ha analizado el comportamiento de los algoritmos diseñados y se han validado sus efectos en el rendimiento global de la red. Los resultados han demostrado la robustez de las técnicas propuestas, que siempre mejoran el rendimiento de la red en diferentes condiciones de tráfico y para distintas posiciones de las femtoceldas. De todas ellas, la estrategia de reparto que alterna los ajustes de los márgenes de traspaso y la potencia de las femtoceldas (técnica CTS) ha presentado los mejores resultados si se desean minimizar los cambios de las condiciones de cobertura en la red. Además, la estrategia que cambia los márgenes de traspaso con freno adaptativo (estrategia MTSAC) ha demostrado que puede alcanzar los mismos resultados con una modificación de márgenes más eficaz.

Esta primera parte que estudia y formula métodos para el reparto de tráfico ha puesto de manifiesto la importancia de la posición de las femtoceldas, no solo en la calidad de servicio ofrecida al usuario, sino también en la capacidad de reparto de

tráfico de las técnicas de alivio de congestión diseñadas. Por ello, la segunda parte del trabajo se ha centrado en el problema del posicionamiento de femtoceldas. En los entornos residenciales estudiados hasta la fecha, no suele realizarse un trabajo de planificación minucioso, ya que la ubicación de la femtocelda depende del usuario. Sin embargo, en las redes de femtoceldas corporativas, sí es probable que, aunque no se realice un estudio exhaustivo en busca de un emplazamiento óptimo, se fije la posición de las femtoceldas teniendo en cuenta aspectos técnicos.

En esta segunda parte, el principal objetivo ha sido ofrecer un conjunto de reglas sencillas que puedan utilizarse a modo de guía para posicionar las femtoceldas, sin necesidad de aplicar un proceso de análisis sofisticado. Con este fin, se ha realizado un análisis de la literatura sobre el problema del posicionamiento de antenas. De este análisis, se ha concluido que, aunque existen numerosos estudios que abordan el problema del posicionamiento de antenas tanto en interiores como exteriores, ninguno de ellos ofrece un conjunto de reglas básicas a seguir para llevar a cabo dicho posicionamiento. Además, se ha comprobado que los algoritmos tradicionales tratan de mejorar los niveles de cobertura y/o calidad de señal en la red, pero ninguno de ellos se plantea mejorar la eficacia de las técnicas de reparto de tráfico basadas en la modificación de márgenes de traspaso.

Como parte de la formulación del problema, se han definido diversos criterios de diseño según los cuales puede realizarse el posicionamiento de femtoceldas. Como principal aportación, se ha propuesto un nuevo criterio de diseño destinado a mejorar el grado de solapamiento entre las celdas de una red. Para ello, se ha diseñado un indicador que cuantifica el grado de solapamiento en función del tamaño de las áreas de baja dominancia en una red (indicador *LDR*). Este indicador ha demostrado ser una buena medida de la capacidad de reparto de tráfico de las técnicas de balance de carga basadas en modificación de márgenes de traspaso.

En base a estos criterios de diseño, se ha realizado un análisis preliminar sobre un simulador de nivel de sistema para encontrar la distribución óptima de femtoceldas en un escenario realista. Analizando las propiedades de los esquemas de posicionamiento obtenidos, se han definido un conjunto de reglas para posicionar femtoceldas en un edificio según diferentes criterios.

Los esquemas de posicionamiento obtenidos se han utilizado para evaluar el impacto del posicionamiento de femtoceldas en el rendimiento de la red en general, y en el comportamiento de las técnicas de reparto de tráfico en particular. Los resultados de las simulaciones han demostrado que, cuando la distribución de usuarios es uniforme, ubicando las femtoceldas por criterios de cobertura y calidad de señal se obtiene un rendimiento ligeramente mejor. Sin embargo, cuando la distribución de usuarios es no uniforme y aparecen problemas de congestión, el criterio de diseño basado en la optimización del indicador de solapamiento (tasa de baja dominancia, *LDR*) obtiene mucho mejor rendimiento que el resto. Así, en escenarios donde los problemas de congestión sean frecuentes, es recomendable distribuir las femtoceldas tratando de maximizar el solapamiento, ya que, aunque las prestaciones son ligeramente inferiores con tráfico uniforme, estos esquemas



responden de manera mucho más flexible a los cambios que se producen en el entorno, convirtiéndolos en esquemas más robustos.

Por último, se ha comprobado que las técnicas de reparto de tráfico por ajuste de potencia son capaces de modificar el solapamiento entre femtoceldas, lo que puede favorecer el rendimiento del resto de técnicas de reparto de tráfico mediante modificación de márgenes de traspaso. De esta manera, las técnicas de reparto de tráfico combinadas que se han propuesto en esta tesis (por ejemplo la técnica CTS), no solo son capaces de equilibrar el tráfico por celda, sino que también pueden resolver las deficiencias de un posicionamiento de femtoceldas inadecuado para el balance de tráfico.

Los métodos propuestos en esta tesis utilizan información disponible en el sistema de gestión de red, y, por ello, pueden integrarse en las herramientas de planificación y optimización automática que ofrecen los fabricantes para el sistema de soporte a las operaciones. Además, su baja carga computacional también permite su implementación de forma distribuida en las femtoceldas, siempre que se dote a éstas de una interfaz de comunicación entre ellas para intercambiar la información necesaria.

## 5.2. Líneas futuras

Son varias las posibles líneas futuras de investigación que se plantean tras realizar este trabajo. Algunas de ellas son mejoras de los métodos de alivio de congestión en femtoceldas propuestos en esta tesis, mientras que otras son extensiones del trabajo a otros problemas de las redes celulares.

Para el problema de congestión en redes de femtoceldas, se identifican las siguientes líneas futuras de trabajo:

- Se plantea aplicar las técnicas de reparto de tráfico diseñadas a otros escenarios de interior como aeropuertos, estaciones de transporte público o centros comerciales, distintos a los corporativos estudiados en esta tesis. Este nuevo tipo de escenarios comparte muchas de sus características con los escenarios corporativos, pero también presentan algunas diferencias importantes, como son: a) la existencia de amplias zonas abiertas y techos más altos, que hace que las condiciones de propagación sean distintas, b) la existencia de espacios de varias alturas sin aislamiento entre ellas, lo que aumenta el acoplamiento entre celdas, y, con ello, los niveles generales de interferencia, o c) la mayor variabilidad temporal del tráfico a medio plazo, por su dependencia de periodos vacacionales, y a corto plazo, salidas y llegadas de pasajeros. Es probable que, para aplicar las técnicas propuestas en estos escenarios, sea necesario realizar pequeños ajustes de los parámetros de los controladores que implementan los métodos (p.ej., los umbrales que determinan la forma y posición de las funciones de pertenencia de entrada y salida de los contro-

ladores difusos). Sin embargo, su adaptación aportaría grandes beneficios a las operadoras y probarían la versatilidad de las soluciones propuestas.

- Esta tesis se ha centrado en la resolución de problemas de congestión persistentes, realizando iteraciones cada hora. Sin embargo, en la práctica, estos algoritmos se pueden aplicar en intervalos de tiempo más cortos para resolver problemas de congestión momentáneos. Se trata de llevar a cabo un ajuste de los parámetros de modo que éstos se adapten de forma rápida a cualquier cambio que se produzca en la red. La principal dificultad en esta aproximación es resolver la falta de fiabilidad de los indicadores de red que guían el proceso de ajuste. Al reducir el intervalo de tiempo que transcurre entre los ajustes que se realizan en los parámetros, los indicadores se basan en un menor número de muestras, por lo que es necesario asegurar que los valores de los mismos son fiables para, así, poder realizar cambios en la red basándose en ellos. Con esta intención, deben establecerse intervalos de confianza en los indicadores, o parar el proceso de ajustes cuando el número de medidas no sea suficiente.
- Durante esta investigación se ha puesto de manifiesto que el desplazamiento de los márgenes de traspaso provoca que algunos usuarios no sean servidos por la celda que les ofrece el mayor nivel de señal. Este efecto origina una degradación de la calidad de conexión, que, además, dificulta el reparto de tráfico. Una posible línea de investigación sería el estudio de técnicas de control de interferencia (*Inter-Cell Interference Coordination*, ICIC) que mejoren la eficacia de las técnicas de reparto de tráfico diseñadas en esta tesis. En esta línea, se ha realizado en [82] un estudio preliminar del uso de estrategias de planificación estática de frecuencias en redes corporativas de femtoceldas LTE. Los esquemas de planificación dinámica de frecuencia pueden ser otra alternativa para reducir la interferencia causada por las colisiones en la interfaz radio [12]. Aun así, las restricciones de coste en la construcción de femtoceldas limitan la complejidad de los algoritmos que pueden aplicarse en estos escenarios. En cualquier caso, el uso conjunto de todas estas técnicas debería potenciar el reparto de tráfico al tiempo que se garantiza una calidad de servicio aceptable.

Otras líneas de extensión del trabajo no relacionadas con el problema de la congestión en femtoceldas son:

- Al igual que las técnicas propuestas pueden aplicarse en otros escenarios de interior con femtoceldas, también pueden aplicarse en escenarios exteriores con macroceldas. Obviamente, las características de los escenarios de macroceldas LTE difieren mucho del escenario utilizado en este estudio. No obstante, muchos de los conceptos planteados en esta tesis son novedosos, como, por ejemplo, la utilización de un indicador de la calidad de conexión previa al traspaso o el uso de la tasa de baja dominancia para la ubicación de emplazamientos. Sería interesante conocer cómo se comportan ambos indicadores en estos escenarios macrocelulares, donde el solapamiento entre

celdas vecinas es más gradual. En esta línea, se trabaja actualmente en la mejora de los algoritmos de balance de carga para macroceldas LTE, haciendo uso del indicador diseñado de calidad previa al traspaso.

- El estadístico de calidad media previa al traspaso construido a partir de trazas de conexión representa una nueva forma de proceder en la monitorización del rendimiento de la red. De manera similar, se pueden obtener otros indicadores que reflejen el rendimiento de la conexión en momentos previos a un evento significativo (p.ej., caída de llamada, traspaso entre tecnologías, ...). Esta información resulta de gran ayuda en otros casos de uso de SON, como la identificación del origen de un problema durante la resolución automática de fallos (p.ej., causas de la caída de llamadas) o la optimización de parámetros de gestión de recursos radio (p.ej., umbral de nivel de señal en traspaso inter-tecnología).

### 5.3. Publicaciones

A lo largo de esta tesis se han generado los siguientes resultados de investigación:

#### Artículos

- [I] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna-Ramírez, M. Toril, F. Ruíz, I. de la Bandera Cascales, P. Muñoz, R. Barco, P. Lazaro, V. Buenestado, “Design of a computationally efficient dynamic system-level simulator for enterprise LTE femtocell scenarios,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, no. 1, p. 14, 2012.
- [II] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna-Ramírez, M. Toril, F. Ruíz, “Traffic steering by self-tuning controllers in enterprise LTE femtocells,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, no. 1, p. 337, 2012.
- [III] J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril y S. Luna-Ramírez, “A femtocell location strategy for improving adaptive traffic sharing in heterogeneous LTE networks,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, no. 1, p. 38, 2015.
- [IV] J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, S. Luna-Ramírez, V. Buenestado y M. A. Regueira, “Analysis of Limitations of Mobility Load Balancing in a Live LTE system,” *IEEE Wireless Communications Letters*, May 2015.

## Solicitudes de patente

- [V] J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, V. Buenestado, M. A. Regueira, S. Pedraza, A. Mendo, “Method and system for computing an intra-system handover performance indicator for self-tuning intra-system handover parameters in a cellular network,” European Patent Application PCT/EP2014/074743, Solicitante Ericsson, Nov 2014.

## Aportaciones a congresos y reuniones científicas

- [VI] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna-Ramírez, M. Toril, F. Ruíz, I. de la Bandera Cascales, P. Muñoz Luengo, “Simulación eficiente de red de femtoceldas en entornos de oficina,” XXVI Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), Leganés (España), Sep 2011.
- [VII] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna Ramírez, M. Toril, F. Ruíz, I. de la Bandera Cascales, P. Muñoz Luengo, “Analysis of load sharing techniques in enterprise LTE femtocells,” 4th International Workshop on Femtocells, Wireless Advanced (WiAd), Jun 2011.
- [VIII] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna Ramírez, M. Toril, F. Ruíz, “Traffic Sharing Techniques in Enterprise LTE Femtocells,” 1st Scientific Meeting, COST action IC1004, Lund (Sweden), Jun 2011.
- [IX] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna Ramírez, M. Toril, F. Ruíz, “Refined approaches for traffic sharing in enterprise LTE femtocells,” 3rd Scientific Meeting, COST action IC1004, Barcelona (Spain), Jun 2012.
- [X] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna Ramírez, M. Toril, F. Ruíz, I. de la Bandera Cascales, P. Muñoz Luengo, “Fuzzy Logic Controllers for Traffic Sharing in Enterprise LTE Femtocells,” IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Yokohama, Japan, May 2012.
- [XI] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna Ramírez, M. Toril, “Impact of femtocell positions on traffic sharing in LTE enterprise scenarios,” 6th Scientific Meeting, COST action IC1004, Málaga (Spain), Feb 2013.
- [XII] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna Ramírez, M. Toril, “Traffic Steering by Self-tuning Controllers in Enterprise LTE Femtocells,” Workshop on Management Frameworks for Future Mobile Communication Networks, Jul 2013.
- [XIII] J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna Ramírez, M. Toril, V. Buenestado, M. A. Regueira, “Limitaciones del balance de carga basado en modificación de márgenes de traspaso en LTE,” XXIX Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), Valencia (España), Sep 2014.

La investigación presentada en el Capítulo 3 se describe en [II, IV, V, VII, VIII, IX, X, XI, XII]. En [IV] y [XIII] se describe el análisis preliminar de las limitaciones del balance de carga en LTE realizado en una red comercial, que aparece al comienzo del mismo capítulo, y en [II, VII, IX, X, XI, XII] se presentan las técnicas de reparto de tráfico en redes de femtoceldas corporativas propuestas. El indicador utilizado para evitar la degradación de la calidad de conexión en ciertas adyacencias durante el reparto de tráfico se ha patentado en [V].

En [III] se presenta el estudio de los esquemas de posicionamiento de femtoceldas descrito en el Capítulo 4. Finalmente, en [I] y [VI] se presenta la herramienta de simulación utilizada como plataforma para los experimentos llevados a cabo en esta tesis, descrita en el Anexo A.

Estas contribuciones se han llevado a cabo en el marco de diversos proyectos de investigación:

- Proyecto TEC2009-13413 (Optimización automática de redes de comunicaciones móviles heterogéneas), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación [I, II, III, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII].
- Proyecto TIC-4052 (Técnicas Adaptativas de gestión de recursos radio en redes B3G), financiado por la Junta de Andalucía [I, II, III, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII].
- Proyecto TIN2012-36455 (Optimización de la calidad de experiencia del servicio de videostreaming 3D en redes 4G), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad [III, IV, XIII].
- Contrato de colaboración entre Optimi-Ericsson y la Universidad de Málaga (Desarrollo de funciones SON para la optimización de redes), financiado a través de la agencia IDEA de la Consejería de Ciencia, Innovación y Empresa de la Junta de Andalucía [IV, V, XIII].

Asimismo, se ha participado con estas contribuciones en el proyecto europeo COST IC1004 (smallCooperative Radio Communications for Green Smart Environments) [VIII, IX, XI, XII].

También en este mismo ámbito, se ha colaborado en los siguientes trabajos relacionados con el tema central de esta tesis:

## Otras aportaciones

- [XIV] V. Buenestado, J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, S. Luna Ramírez, “Optimización de Parámetros de Traspaso en Femtoceldas Corporativas LTE,” XXVII Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), Elche (España), Sep 2012.

- [XV] P. Muñoz, R. Barco, J. M. Ruiz-Avilés, I. de la Bandera, A. Aguilar, “Fuzzy Rule-Based Reinforcement Learning for Load Balancing Techniques in Enterprise LTE Femtocells,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 5, pp. 1962–1973, Jun 2013.
- [XVI] F. J. Rufian Martínez, J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril y S. Luna Ramírez, “Análisis del impacto del uso de repetidores en entornos de microceldas LTE-Advanced,” XXVIII Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), Santiago de Compostela (España), Sep 2013.
- [XVII] V. Buenestado, J. M. Ruiz-Avilés, M. Toril, S. Luna-Ramírez, A. Mendo, “Analysis of Throughput Performance Statistics for Benchmarking LTE Networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1607–1610, Sep 2014.
- [XVIII] R. D. García Morales, M. Toril, J. M. Ruiz-Avilés, S. Luna Ramírez, “Algoritmos de Planificación Estática de Frecuencias en Femtoceldas LTE,” XXIX Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), Valencia (España), Sep 2014.
- [XIX] V. Buenestado, M. Toril, J. M. Ruiz-Avilés, I. de la Bandera Cascales y M. A. Regueira, “A new cell overshooting indicator for optimizing remote electrical tilt,” European Patent Application PCT/EP2014/067819, Solicitante Ericsson, Aug 2014.



## Apéndice A

# Anexo: Herramienta de simulación

En este anexo se presenta la herramienta de simulación utilizada para los experimentos llevados a cabo en este trabajo. La herramienta es un simulador dinámico de red LTE de nivel de sistema. El código del simulador ha sido implementado en MATLAB, por su eficiencia en la manipulación de matrices. A través de archivos de configuración, es posible seleccionar tanto el escenario de simulación como los parámetros del sistema sin tener un conocimiento profundo de los distintos algoritmos y funcionalidades de red implementadas.

En las siguientes secciones se describen las funcionalidades más importantes del simulador. En la primera sección se presenta la estructura básica del simulador, mientras que en las siguientes secciones se explican las funcionalidades de las capas física, de enlace y de red respectivamente.

### A.1. Estructura básica

A continuación se describen los principales bloques del simulador, que son el escenario de simulación, el modelo de movilidad, el modelo de distribución espacial de tráfico y el modelo de servicio.

#### A.1.1. Escenario de simulación

La Figura A.1 muestra el escenario de simulación implementado. Con una superficie de dimensiones  $3 \times 2.6 \text{ km}^2$ , está formado por tres macroceldas tri-sectoriales que pertenecen al mismo emplazamiento (celdas de línea gruesa en la figura). Para evitar efectos de borde en sus indicadores de rendimiento, el simulador incorpora la técnica de envoltura (*wrap-around*) descrita en [83]. La envoltura es una técnica que introduce réplicas del escenario rodeando el escenario original (celdas de línea gris en la figura). Estas réplicas se comportan como fuentes de



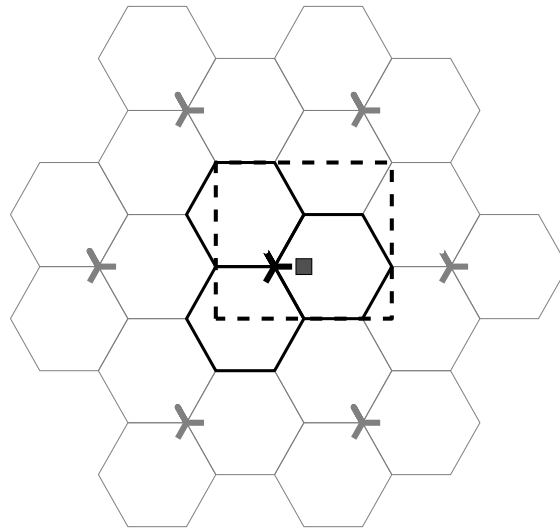


Figura A.1: Escenario de simulación.

interferencia en los bordes del escenario original (recuadro de línea discontinua en la figura), evitando así que el comportamiento en los bordes de este no sea distinto al del centro. Cuando se realizan simulaciones, el rendimiento de la red sólo es evaluado en el escenario original.

Dentro de una de las macroceldas, se coloca un edificio de oficinas de  $50 \times 50 \text{ m}^2$  (cuadrado relleno de color gris en la figura). El número de plantas del edificio es configurable, siendo 5 las plantas definidas para la mayoría de experimentos del presente trabajo. La Figura A.2 muestra el plano de una planta, idéntico para todas las plantas del edificio. Los círculos representan la posición de las femtoceldas en su posición original, que puede modificarse. Las líneas representan muros y los rombos, puestos de trabajo.

### A.1.2. Modelo de movilidad de usuario

El modelo de movilidad implementado para exteriores es simple, ya que este movimiento solo tiene influencia a gran escala. Los usuarios se mueven con una velocidad constante de  $3 \text{ km/h}$  en una dirección aleatoria, que no cambia, y que se decide al comienzo de la llamada.

Por el contrario, en interiores, la movilidad de los usuarios suele ser más compleja y tiene mayor importancia, pues pequeños movimientos pueden tener un gran impacto en su nivel de señal recibido. El modelo de movilidad desarrollado para

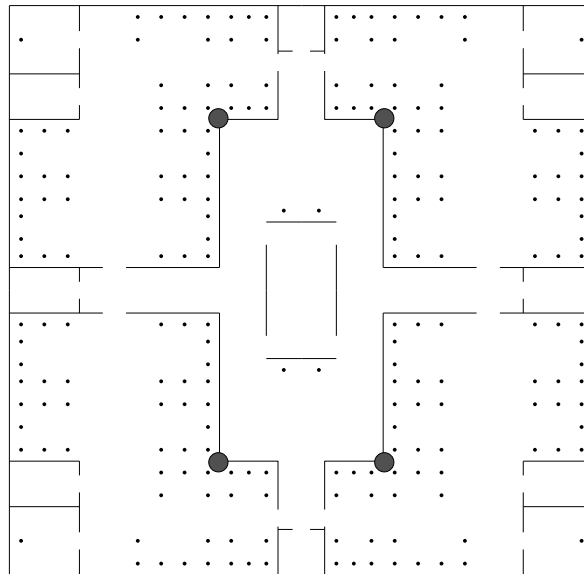


Figura A.2: Plano de las plantas del edificio.

los usuarios interiores es una extensión del modelo de movimiento aleatorio por destinos (*random waypoint*) presentado en [58]. Los usuarios permutan entre un estado estacionario y un estado de movimiento. Se define un conjunto de puntos de localización sobre el plano del escenario que el usuario podrá seleccionar como puntos de destino. Cada uno de estos puntos tiene una probabilidad de mantener al usuario en estado estacionario o migrar hacia otro punto. El tiempo que un usuario permanece en estado estacionario sigue una distribución geométrica. Los puntos que están en las oficinas simulan puestos de trabajo y por lo tanto los usuarios que están en ellos tienen asociada una alta probabilidad de permanecer en estado estacionario. Por el contrario, los puntos situados en los pasillos representan puntos de paso donde la probabilidad de permanecer en estado estacionario es nula.

A diferencia de [58], donde los usuarios cambiaban al estado de movimiento solo para abandonar el puesto de trabajo, en este caso el punto de destino puede ser tanto otro escritorio dentro de la misma habitación como la puerta al pasillo. La velocidad de los usuarios cuando están en movimiento es de 1 km/h. Si los usuarios llegan a la puerta que da acceso al pasillo, seleccionan el siguiente punto de destino de entre los que hay en el pasillo usando una distribución de probabilidad no uniforme. Esta distribución depende de la regularidad con la que los usuarios usan cada habitación. Por ejemplo, la sala del café, la sala de reuniones o los lavabos son estancias visitadas con mucha regularidad. Los puntos de localización dentro de estas estancias se tratan como si fuesen puestos de trabajo con sus características propias. Cuando un usuario llega a un puesto de trabajo, cambia automáticamente a estado estacionario. Por simplicidad, los usuarios no pueden cambiar de planta.

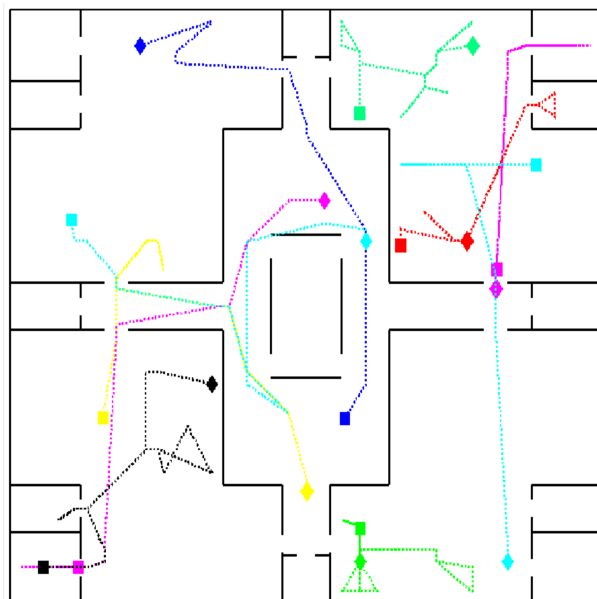


Figura A.3: Ejemplo de trayectorias de usuario.

Las trayectorias de los usuarios son líneas rectas entre el punto de origen y el punto de destino. Por lo tanto, debe existir línea de visión directa entre ambos puntos. Es por esta razón por la que se han definido puntos auxiliares de paso para así evitar atravesar muros en los desplazamientos.

Por último, cabe destacar que las trayectorias son precalculadas y almacenadas en un archivo, que posteriormente se utiliza como entrada durante la simulación. Precalculando las trayectorias, en lugar de hacerlo en tiempo real durante la simulación, se reduce significativamente la carga computacional de la simulación y se obtienen tiempos de ejecución menores. Un beneficio adicional de precalcular las trayectorias, es que éstas pueden reutilizarse para diferentes experimentos, asegurando de esta forma su repetitividad. Un ejemplo de trazas de movilidad de usuario puede verse en la Figura A.3

### A.1.3. Distribución espacial del tráfico

Los usuarios pueden distribuirse en el escenario de forma uniforme o no uniforme. En el caso de distribución uniforme, los usuarios pueden aparecer en cada punto del escenario con la misma probabilidad. No obstante, con la intención de reproducir situaciones más realistas, el simulador ofrece la posibilidad de crear una distribución de tráfico irregular, lo que permite crear concentraciones de usuarios en determinadas zonas (por ejemplo, una de las oficinas en particular).

Para implementar esta posibilidad, se definen probabilidades con la que los usuarios comienzan su llamada en cada una de las oficinas. Estas probabilidades se utilizan para la generación de las trazas de movilidad, forzando a que la posi-

ción inicial de cada trayectoria esté en el área deseada según la distribución de probabilidades.

#### A.1.4. Modelo de servicio

El servicio que se ha incluido en el simulador es voz sobre IP (*Voice over IP*, VoIP). El servicio de VoIP se ha definido como una fuente que genera paquetes de 40 bytes cada 20 ms [84], lo cual equivale a una tasa de transmisión de 16 kbps durante el tiempo que dure la llamada. Como se mostrará más adelante, la asignación de recursos en el simulador se realiza cada 10 ms, por lo que el servicio de VoIP se ha implementado en el simulador como usuarios que transmiten 20 bytes cada 10 ms.

Para este servicio es necesario determinar cuándo se interrumpe el servicio por un problema en la conexión. Esta interrupción se produce cuando un usuario no recibe paquetes durante un intervalo de tiempo específico. La razón por la que no se le asignan recursos a un usuario es porque, bien la calidad de su conexión está por debajo de un cierto umbral, por lo que no se le puede garantizar una mínima tasa de error, o bien porque no hay recursos disponibles suficientes. En esta situación, tras pasar un cierto tiempo, el servicio se interrumpe, considerándose como una llamada caída. En el presente trabajo, se desactivan las llamadas caídas para facilitar el análisis de las técnicas presentadas. Así, una llamada que en otras circunstancias se interrumpiría, en el presente trabajo aparece como una llamada que experimenta una calidad muy baja.

El tráfico de la red viene dado por el número de usuarios que se configura para cada simulación. Las llamadas ofrecidas siguen una distribución de Poisson con  $\lambda = 0.42 \text{ llamadas}/(\text{usuario} \cdot \text{hora})$ , y la duración de las llamadas sigue una distribución exponencial de media 100 s.

## A.2. Capa física

En esta sección se describe el modelado de la capa física. Se define primero el modelo de propagación utilizado y, a continuación, el cálculo del desvanecimiento rápido.

### A.2.1. Modelo de propagación

Los modelos de propagación usados están basados en los propuestos en el proyecto WINNER II [57]. Los escenarios que se contemplan se clasifican según la situación de la antena de la estación base y el terminal móvil, respectivamente, en modelos de interior-interior, interior-exterior, exterior-interior y exterior-exterior. Todos los modelos comparten una misma estructura para la función de cálculo de las pérdidas, e incluyen características importantes como diferenciación entre línea

Tabla A.1: Parámetros del modelo de propagación[57].

Escenario			Perdidas de propagación	$\sigma_{SF}[dB]$
Interior-Interior	A1	LOS	$A = 18.7, B = 46.8, C = 20$	6
		NLOS	$A = 20, B = 46.4, C = 20$ $X = 5 \cdot N_{muros}$ $FL = 17 + 4 \cdot (N_{plantas} - 1)$ (Atenuación entre plantas)	
Interior-Exterior	A2		$PL = PL_b(d_{int} + d_{ext}) + PL_{insec.} + PL_{in}(d_{int})$ $PL_b \rightarrow A = 22.7, B = 41, C = 20$ $PL_{insec.} = 14 + 15(1 - \cos(\theta))$ $PL_{int} = PL_{A1}$	6
Exterior-Exterior	C2	LOS	$d < d_{BP} \rightarrow A = 26B = 39C = 20$ $d > d_{BP} \rightarrow PL = 40\log(d) + 13.47 + 14\log(h_{BS} - 1) - 14\log(h_{MS} - 1) + 6\log(f_c/5)$	4 6
		NLOS	$PL = (44 - 6.55\log(h_{BS}))\log(d) + 34.46 + 5.83\log(h_{BS}) + 23\log(f_c/5)$	8
Exterior-Exterior	C4		$PL = PL_{C2}(d_{int} + d_{ext}) + 17.4 + 0.5d_{in} - 0.8h_{MS}$	8

de visión directa y no directa (*Line-Of-Sight/Non-Line-Of-Sight*, LOS/NLOS), atenuación debida a los muros y difracción. En todos modelos, las pérdidas de trayecto se calculan con la expresión

$$PL[dB] = A\log(d[m]) + B + C\log(f[\text{GHz}]/5) + X, \quad (\text{A.1})$$

donde los parámetros  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $X$  dependen del entorno de propagación. La Tabla A.1 muestra los valores de esos parámetros para los diferentes escenarios.

Cuando la simulación está en proceso, la posición de los usuarios se actualiza cada nueva iteración, y consecuentemente, la potencia recibida por los usuarios desde cada estación base también debe actualizarse. Realizar estos cálculos es una tarea complicada si se realiza durante la simulación. Como alternativa, las pérdidas de propagación se precálculan antes de comenzar la simulación, almacenando estos cálculos en matrices de propagación que contienen las pérdidas desde cada estación base a cada punto del escenario con una cierta resolución. De esta forma, se reduce la carga computacional de las simulaciones. Para realizar estos cálculos, el escenario se divide en una rejilla de posiciones, cada una de las cuales representa un elemento de la matriz. Los valores de la matriz se calculan sumando tres componentes: a) la directividad de la antena; b) las pérdidas de trayecto (PL) y c) el desvanecimiento lento (*Slow Fading*, SF). Dependiendo de la posición de la estación base y del equipo móvil, se usa el modelo correspondiente en la Tabla A.1. Por ejemplo, la atenuación de la señal desde una macrocelda hasta un punto interior al edificio se calcula con el modelo C4. Por eficiencia computacional, el modelo A2 (interior-exterior) se implementa solamente en un anillo de 5 metros alrededor del edificio.

La Figura A.4 muestra (sin conservar la escala por claridad) un mapa de colores con la atenuación en dB desde una macrocelda a todos los puntos exteriores del escenario y desde una femtocelda de la primera planta a todos los puntos en el edificio. Para los cálculos de propagación, el escenario se divide en tres rejillas de puntos diferentes, una para exterior-exterior, otra para exterior-interior, y

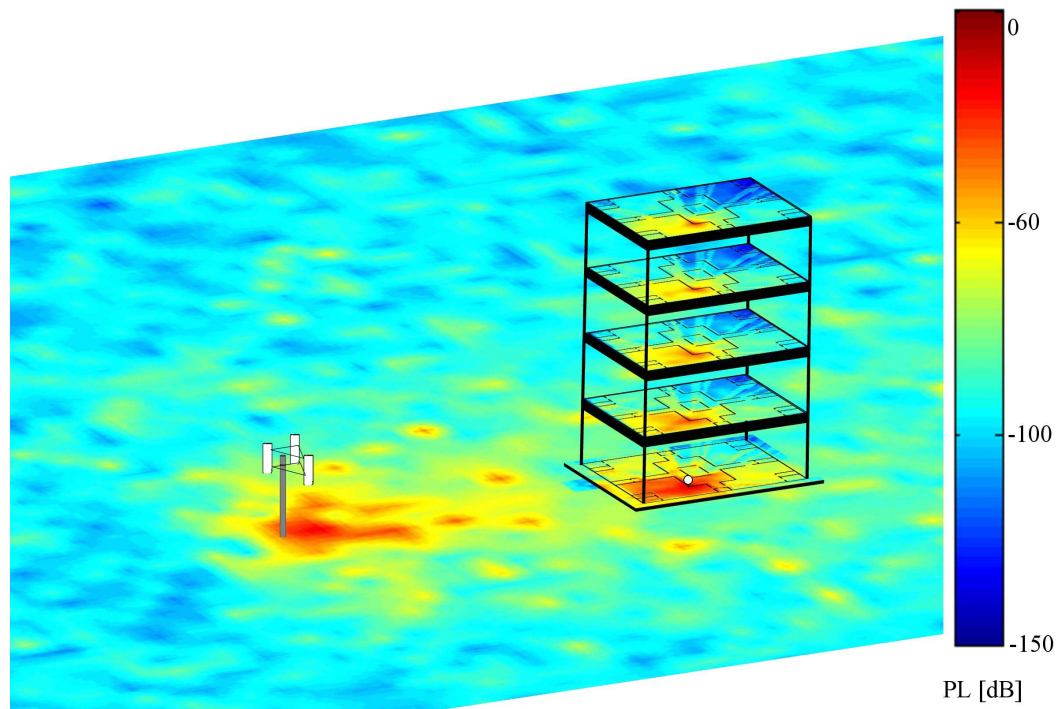


Figura A.4: Pérdidas de propagación de una macrocelda y una femtocelda del primer piso.

una última que comprende interior-interior e interior-exterior (el modelo interior-exterior es usado para el anillo de 5 metros alrededor del edificio). La resolución de cada una de estas rejillas es de 20 m, 1 m y 1 m respectivamente.

Durante las simulaciones, para conocer los valores de las pérdidas de propagación experimentadas por un usuario, solo es preciso comprobar la posición ocupada por el usuario en el escenario e interpolar los valores de la matriz de propagación más cercanos, dependiendo de la posición relativa del usuario en la rejilla.

### A.2.2. Modelo de desvanecimiento rápido

Para modelar el efecto de la propagación multicamino, es necesario caracterizar el canal radio móvil. Este canal tiene un comportamiento distinto para cada usuario, cada instante de tiempo y cada frecuencia. Para incluir esta característica en el simulador, se han generado de una serie de realizaciones de canal para todo el ancho de banda del sistema.

El canal de radiopropagación móvil se puede caracterizar como un sistema lineal variante en el tiempo [85]. Su respuesta al impulso es bidimensional, dependiente del retardo de las diferentes componentes multicamino y del tiempo. Para simular usuarios a distintas velocidades, las realizaciones multicamino no pueden depender de la variable tiempo. Por esta razón, a la hora de obtener estas realiza-

ciones, se selecciona como variable independiente la posición del usuario. De esta forma, se obtiene la respuesta del canal para cada posición del escenario.

En los estándares se especifica la dependencia con la variable retardo, proporcionando los llamados perfiles de potencia del canal. Estos perfiles de potencia dan información sobre los múltiples caminos recorridos por la señal hasta el receptor y, por tanto, detallan los ecos de la señal que deben considerarse, aportando el valor de retardo y de potencia relativa asociado a cada uno de ellos.

Para obtener la dependencia con respecto a la posición, se aplica el modelo Rayleigh [86] en banda estrecha a cada una de las componentes multicamino. En el interior del edificio, donde las femtoceldas se encuentran en oficinas abiertas, los usuarios suelen tener condiciones de LOS con la femtocelda. Estas condiciones implican la aparición de un rayo dominante cuya potencia es considerablemente más alta que la de las componentes multicamino. Para modelar este efecto, es más adecuado usar una distribución tipo Rice en lugar de tipo Rayleigh. La función densidad de probabilidad de Rice tiene un parámetro de relación entre el rayo directo y el multicamino, que cuando tiende a cero, hace tender a la distribución a una de tipo Rayleigh. Por tanto, para generar la rejilla con la distribución de Rice, se añade la componente LOS a las rejillas generadas previamente con la distribución Rayleigh.

Tras este proceso, se obtiene una variable gaussiana compleja bidimensional que se filtra con un filtro Doppler bidimensional siguiendo las indicaciones establecidas en [17]. Esto permite obtener una respuesta al impulso del canal dependiente de la distancia que separa el transmisor del receptor, en lugar de ser una respuesta al impulso variante en el tiempo. La Figura A.5 muestra un ejemplo de la respuesta al impulso bidimensional para el modelo *Extended Indoor A*, utilizado en este trabajo para modelar el canal de interior.

El último paso es la transformación de la variable retardo a la variable frecuencia, ya que en el simulador se necesita la respuesta del canal para cada posición del escenario y cada frecuencia del ancho de banda del sistema. Esto se logra mediante el operador transformada de Fourier. La Figura A.6 muestra un ejemplo de la función de transferencia del canal obtenida.

Por idénticas razones a las expuestas en la sección anterior, se precálculan las atenuaciones desde cada estación base a cada posición del escenario por desvanecimiento rápido (*fast fading*). A diferencia del caso anterior, la resolución de la rejilla espacial debe ser mucho mayor para apreciar el desvanecimiento rápido (15 cm, en interiores), haciendo inviable, por razones de memoria, construir una rejilla que englobe todo el escenario. Como solución para simular los desvanecimientos rápidos, se construyen tres rejillas, correspondientes al área exterior, al área interior LOS y al área interior NLOS, que están basadas en los modelos descritos por los estándares (es decir, *Extended Pedestrian A* [87], *Extended Indoor A* [17]). Estas tres rejillas, cuyo tamaño es de  $48 \times 48 \text{ m}^2$ , se reutilizan para cubrir el escenario completo.

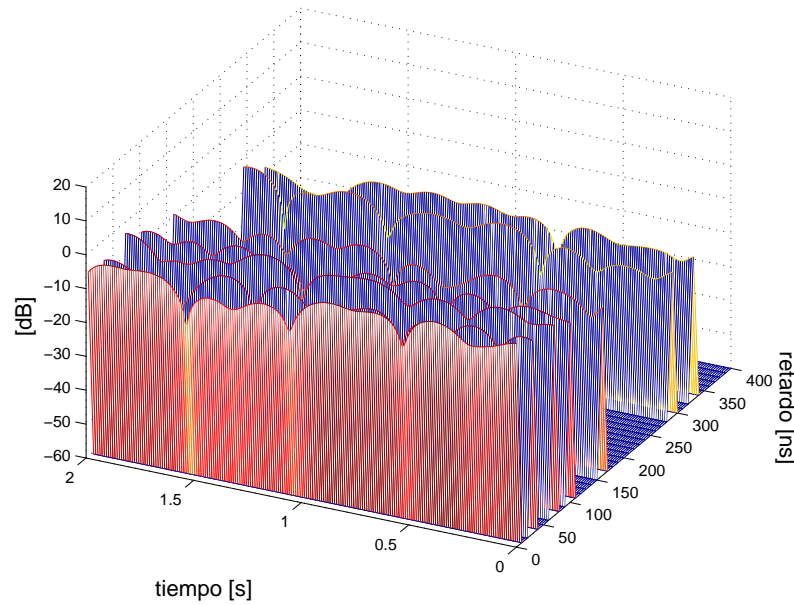


Figura A.5: Respuesta al impulso bidimensional para el modelo *Extended Indoor A*.

### A.3. Capa de enlace

A continuación se definen las principales funcionalidades de la capa de enlace en el simulador, que son el cálculo de *Signal to Interference Ratio* (SIR), el esquema HARQ, la adaptación del enlace y la asignación de recursos.

#### A.3.1. Cálculo de SIR

La SIR es una medida representativa de la calidad de la conexión. Para calcular la SIR en el simulador, es necesario calcular primero la interferencia que experimenta cada usuario. Se asume que la interferencia intracelda en LTE es despreciable. Por tanto, únicamente se considera la interferencia intercelda cocanal, debida a usuarios que usan el mismo canal en otras celdas. Para este cálculo de interferencia, se necesita conocer la señal recibida por cada usuario desde cada estación base.

El cálculo de la SIR para una subportadora dada  $k$ ,  $\gamma_k$ , se realiza usando la expresión propuesta en [88]:

$$\gamma_k = P(k) \times \bar{G} \times \left( \frac{N}{N + N_k} \right) \times \frac{R_D}{N_{SD}/N_{ST}}, \quad (\text{A.2})$$

donde  $P(k)$  representa el desvanecimiento selectivo en frecuencia para la subportadora  $k$ ,  $G$  incluye las pérdidas de propagación, el desvanecimiento lento, el ruido



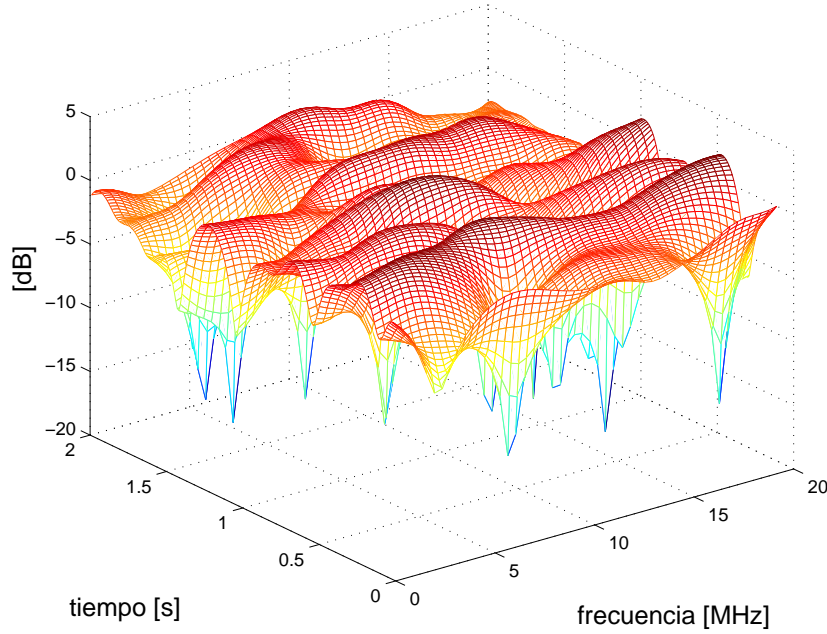


Figura A.6: Función de transferencia para el modelo *Extended Indoor A*.

térmico y la interferencia,  $N$  es el tamaño de la *Fast Fourier Transform* (FFT) usada en la generación de la señal OFDM,  $N_p$  es el tamaño del prefijo cíclico,  $R_D$  indica el porcentaje máximo disponible de potencia de transmisión asignado a las subportadoras de datos,  $N_{SD}$  es el número de subportadoras por intervalo de transmisión (TTI) y  $N_{ST}$  es el número de subportadoras útiles por TTI.

Asumiendo que la magnitud y la fase del desvanecimiento multicamino son constantes durante el intervalo de observación, el desvanecimiento selectivo en frecuencia para la subportadora  $k$  se calcula usando la expresión

$$P(k) = \left| \sum_p M_p A_p e^{j[\theta_p - 2\pi f_k T_p]} \right|^2, \quad (\text{A.3})$$

donde  $p$  es el índice de camino,  $M_p$  y  $\theta_p$  representan los valores de la amplitud y la fase del desvanecimiento multicamino respectivamente,  $A_p$  es el valor de amplitud correspondiente a la potencia media para el camino  $p$ ,  $f_k$  es el *offset* de frecuencia relativo dentro del espectro para la subportadora  $k$ , y  $T_p$  es el tiempo de retardo relativo del camino  $p$ . Además, se asume que el desvanecimiento está normalizado de forma que  $E[P(k)] = 1$ .

El valor de  $\bar{G}$  se calcula de la expresión

Tabla A.2: Valores de  $\beta$  dependiendo del esquema de modulación y codificación.

Modulación	Codificación	Factor $\beta$	Modulación	Codificación	Factor $\beta$
QPSK	1/3	1.49	16QAM	3/4	7.33
QPSK	2/5	1.53	16QAM	4/5	7.68
QPSK	1/2	1.57	64QAM	1/3	9.21
QPSK	3/5	1.61	64QAM	2/5	10.81
QPSK	2/3	1.69	64QAM	1/2	13.76
QPSK	3/4	1.69	64QAM	3/5	17.52
QPSK	4/5	1.65	64QAM	2/3	20.57
16QAM	1/3	3.36	64QAM	3/4	25.16
16QAM	1/2	4.56	64QAM	4/5	28.38
16QAM	2/3	6.42			

$$\bar{G} = \frac{P_{max} \frac{g_n(UE) \times g_{UE}}{PL_{UE,n} \times SH_{UE,n}}}{P_{ruido} + \sum_{k=1, k \neq n}^N P_{max} \times \frac{g_k(UE) \times g_{UE}}{PL_{UE,k} \times SH_{UE,k}}}, \quad (A.4)$$

donde  $g_n$  es la ganancia de la antena servidora en la dirección del usuario,  $g_{UE}$  la ganancia del equipo terminal del usuario,  $P_{noise}$  es la potencia de ruido térmico,  $PL_{UE,k}$  son las pérdidas de propagación entre el usuario y la estación base  $k$ ,  $SH_{UE,k}$  son las pérdidas por desvanecimiento lento entre el usuario y la estación base  $k$  y  $N$  es el número de estaciones base interferentes consideradas (en este caso, todas las estaciones base del escenario).

Un PRB es la mínima cantidad de recursos que pueden asignarse para la transmisión en LTE. Ya que un PRB contiene 12 subportadoras, es necesario agregar los valores de  $SINR$  calculados previamente para cada subportadora en un único valor. Así, la  $SINR$  efectiva,  $SINR_{ef}$ , puede calcularse mediante la expresión

$$SINR_{ef} = -\beta \ln \left( \frac{1}{N_u} \sum_{k=1}^{N_u} e^{-\frac{\gamma_k}{\beta}} \right), \quad (A.5)$$

donde  $\beta$  es un parámetro que depende del esquema de modulación y codificación (MCS), utilizado en el PRB [89], asumiendo que todas las subportadoras del PRB tienen la misma modulación, y  $N_u$  es el número de subportadoras usado para calcular la  $SINR$  efectiva. El valor de  $\beta$  se ha elegido de forma que la probabilidad de error de bloque para todas las subportadoras sea similar a la obtenida para la  $SINR$  efectiva en un canal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) [90]. El valor de  $\beta$  para cada MCS se muestra en la Tabla A.2.

Una vez que se ha calculado la  $SINR$  efectiva, se puede deducir la probabilidad de error de bloque (*Block Error Rate*, BLER). Existen curvas que establecen la relación entre los valores de  $SINR$  y BLER para un canal con ruido gaussiano aditivo (AWGN) y cada combinación de esquemas de modulación y codificación. El mapeo entre  $SINR$  y BLER puede realizarse utilizando estas curvas.

### A.3.2. Esquema HARQ

El mecanismo de retransmisión automática híbrido (HARQ) es una función de la capa de red de LTE que permite realizar las retransmisiones directamente en la capa física o de acceso al medio. En [91] se presenta un modelo poco complejo capaz de predecir la ganancia que introduce HARQ en la capa física. Ya que a cada retransmisión HARQ se obtiene una mejora de la BLER, se propone calcular un nuevo valor de  $SINR$  como

$$SINR(i) = SINR + SINR_{ganancia}(i) , \quad (A.6)$$

donde  $i$  representa la retransmisión  $i$ -ésima. El valor de  $SINR_{ganancia}$ , que depende del valor de redundancia para el índice  $i$  y del MCS utilizado, puede obtenerse de tablas que aparecen en [91].

Una vez que se ha obtenido el valor de BLER, teniendo en cuenta el MCS utilizado en la transmisión es posible calcular la tasa de transmisión,  $T_i$ , para cada usuario como

$$T_i = (1 - BLER(SINR_i)) \times \frac{D_i}{TTI} , \quad (A.7)$$

donde  $D_i$  es la carga útil por bloque en bits [92], que depende del MCS seleccionado para el usuario en ese intervalo de tiempo, TTI es el intervalo de tiempo de transmisión y  $BLER(SINR_i)$  es el valor de BLER obtenido para la  $SINR$  efectiva.

### A.3.3. Adaptación del enlace

Antes de explicar la función de adaptación del enlace, es necesario introducir el parámetro estandarizado por 3GPP conocido como indicador de calidad de canal (CQI). Éste es un indicador que representa la calidad de la conexión en una subbanda del espectro. La resolución del CQI es de 4 bits, aunque se puede transmitir de manera diferencial para reducir la carga de señalización. Por tanto, solo hay un subconjunto de MCS posibles para un valor de CQI [93]. En el simulador, cada usuario reporta el CQI a la estación base cada iteración (100 ms).

Basándose en los valores de CQI, la función de adaptación del enlace selecciona el MCS más apropiado para transmitir la información en el *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) dependiendo de las condiciones de propagación. El CQI se usa para cuantificar la calidad del enlace para cada usuario y en cada subbanda del espectro. Si se necesita mantener un valor de BLER por debajo de un mínimo para un determinado servicio, es posible establecer una relación  $SINR$ -CQI que permita seleccionar el MCS más apropiado para cada valor de  $SINR$  [94]. El 3GPP define un campo para el MCS de 5 bits en el enlace descendente de control. Esto ofrece una gran variedad de posibles MCS. Por simplicidad, el simulador solo

incluye un conjunto de MCS igual al de valores de CQI. Por tanto, a partir del valor de  $SINR$  efectiva puede calcularse el valor de CQI, y a partir de éste decidir el MCS a utilizar durante la siguiente iteración.

#### A.3.4. Asignación de recursos

En el simulador se incluyen distintos algoritmos de planificación de recursos (*schedulers*). De esta manera se pueden realizar comparaciones del funcionamiento de distintos *schedulers* en función de las distintas situaciones simuladas. En todas las alternativas se considera el parámetro CQI como parámetro de información sobre la calidad del canal experimentada por cada usuario.

Como se ha comentado anteriormente, la resolución temporal del simulador es de 100 ms. Para reducir el tiempo de ejecución, la planificación se realiza para intervalos de 10 ms (en lugar de 1 ms, como en la realidad) y se supone que esta planificación se repite durante 100 ms. Con ello, se reduce el tiempo de ejecución del simulador significativamente. Para hacer la planificación se supone que cada PRB está formado por 10 slots de 1 ms cada uno. En el simulador, cada uno de estos slots es la unidad mínima de asignación. Un usuario puede ocupar todos los slots que necesite, en función de su CQI, pero siempre dentro del mismo PRB.

Aunque en el simulador se han implementado varias estrategias de planificación de recursos, en este trabajo solo se ha utilizado la estrategia *Round Robin-Best Channel*. El objetivo general de la técnica de Round Robin es maximizar la eficiencia del canal intentando no perjudicar a usuarios que puedan tener peores condiciones de canal. Para ello, este planificador utiliza distintas estrategias para la planificación en tiempo y en frecuencia. Para la planificación en tiempo, se aplica la técnica de Round Robin, que permite seleccionar los usuarios por orden de llegada, sin tener en cuenta las condiciones de canal que experimenta cada uno de ellos. Después, para cada usuario, se busca el PRB para el que se consigue mejor tasa de transmisión estimada (estimación hecha según el valor de CQI para cada PRB).

En cada iteración y para cada estación base, esta técnica se puede expresar matemáticamente como

$$\hat{i}[n+1] = (\hat{i}[n] + 1) \bmod N_u, \quad (\text{A.8})$$

$$\hat{k}[n] = \max_k \{r_{ik}[n]\}, \quad (\text{A.9})$$

donde  $\hat{i}$  representa el usuario seleccionado,  $\hat{k}$  representa el PRB seleccionado,  $r_{ik}$  representa la tasa de transmisión de usuario  $i$  en el PRB  $k$  y  $N_u$  es el número total de usuarios.

## A.4. Capa de red

La principal función de la capa de red es la gestión de recursos radio (RRM). En esta sección se describen el algoritmo de control de admisión y las técnicas de traspaso incluidas en el simulador. Debe tenerse en cuenta que, aunque la planificación de recursos suele incluirse entre las funcionalidades de la capa de red, se ha descrito como parte de la capa de enlace, puesto que es en ese nivel donde se implementa en el simulador.

### A.4.1. Control de admisión

Una vez que el usuario decide comenzar una conexión, el primer paso es determinar qué celda será su servidora. Esta decisión se realiza en dos pasos. En primer lugar se comprueba si el nivel de señal recibido es suficiente. Para ello, el terminal envía a la red el nivel de señal de referencia (RSRP) medido para la celda en la que está acampado y para sus vecinas. Tras ordenar las celdas de mayor a menor nivel, las celdas candidatas son aquéllas que cumplen

$$RSRP(i) \geq RSRP_{min}(i) , \quad (A.10)$$

donde  $RSRP(i)$  es una medida en todo el ancho de banda del nivel de las señales de referencia para la celda  $i$ , y  $RSRP_{min}$  es el mínimo nivel de señal requerido para aceptar una conexión, que es un parámetro definido a nivel de celda. Finalmente, la mejor celda  $i$  en la lista se selecciona como primera opción. A continuación se comprueba si la celda seleccionada como primera opción tiene recursos disponibles. Hay que tener en cuenta que la red no sabe qué cantidad de recursos necesitará el usuario una vez haya iniciado la conexión, ya que las medidas de calidad realizadas son sobre las señales de referencia, y las condiciones del canal de datos que finalmente le sea asignado al usuario pueden ser distintas. Es por esta razón por la que en el simulador se usa un criterio de “caso peor” para aceptar al usuario.

### A.4.2. Algoritmos de traspaso

El algoritmo de traspaso (HO) es la principal funcionalidad para controlar la movilidad de los usuarios conectados. El traspaso implementa el cambio de conexión del usuario de una celda a otra. Aunque los algoritmos de traspaso son específicos de cada fabricante, a continuación se describen algunos de los algoritmos de traspaso clásicos:

1. *Traspaso por calidad.* Un traspaso por calidad se lleva a cabo cuando

$$RSRQ(i) \leq RSRQ(j) \text{ durante } TTT_{qual} , \quad (A.11)$$

y

$$RSRP(j) - RSRP(i) \geq HOM_{qual}(i, j) , \quad (A.12)$$

donde *Reference Signal Received Quality* (RSRQ) es la calidad de la señal de referencia recibida, medida a partir de la *SINR* de las señales de referencia, RSRP es la potencia de la señal de referencia recibida,  $TTT^{Calidad}$  es el tiempo durante el que deben cumplirse las condiciones de umbral de calidad, y  $HOM_{qual}(i, j)$  es el margen de traspaso por calidad, que determina el nivel de histéresis entre la servidora y las celdas adyacentes,  $i$  y  $j$ , respectivamente. Este traspaso trata de reasignar conexiones que están experimentando una mala calidad en su celda servidora a una celda vecina, en la que previsiblemente experimentará mejor calidad. El parámetro  $HOM_{qual}(i, j)$  se define a nivel de adyacencia.

2. *Traspaso por nivel*. Un traspaso por nivel se dispara cuando

$$RSRP(i) \leq RxLevMin(i) , \quad (A.13)$$

y

$$RSRP(j) - RSRP(i) \geq HOM_{lev}(i, j) , \quad (A.14)$$

donde  $RxLevMin$  es un umbral de mínima señal recibida, definido a nivel de celda. Los traspasos por nivel tratan de reasignar conexiones que están experimentando un nivel de señal muy bajo (por ejemplo, un usuario que está saliendo del area de cobertura de una celda). Se considera a este tipo de traspaso como un traspaso urgente y, por lo tanto, debe llevarse a cabo inmediatamente. Esta es la razón por la que no se contempla un parámetro TTT.

3. *Traspaso por balance de potencia*. Un traspaso por balance de potencia (PBGT) se dispara cuando

$$RSRP(j) - RSRP(i) \geq HOM_{PBGT}(i, j) . \quad (A.15)$$

En este caso no hay una primera condición que deba cumplirse y solo se evalúa la Ecuación A.15. Un traspaso por PBGT no se considera urgente, sino que forma parte de los traspasos de optimización, ya que trata de que el usuario esté siempre conectado a la celda que ofrezca las mínimas pérdidas de propagación (siempre que  $HOM_{PBGT}$  sea positivo). En el resto de la memoria, se utiliza el término  $HOM$  para referirse a  $HOM_{PBGT}$  por brevedad.



# Bibliografía

- [1] J. Zhang, G. de la Roche, *Femtocells: Technologies and Deployment*. Wiley, 2010.
- [2] S. Saunders, “The role of cooperation in establishing an efficient femto economy,” *2nd International Conference on Home Access Points and Femtocells*, pp. 1–5, Dic 2007.
- [3] V. Chandrasekhar, J. Andrews, A. Gatherer, “Femtocell networks: a survey,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 9, pp. 59–67, Sep 2008.
- [4] H. Zhang, X. Wen, B. Wang, W. Zheng, Y. Sun, “A novel handover mechanism between femtocell and macrocell for LTE based networks,” *2nd International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, pp. 228–231, Feb 2010.
- [5] A. Pras, J. Schonwalder, M. Burgess, O. Festor, G. Perez, R. Stadler, B. Stiller, “Key research challenges in network management,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 10, pp. 104–110, Oct 2007.
- [6] NGMN, “Next Generation Mobile Networks Recommendation on SON and O&M requirements, Version 1.23,” 2008.
- [7] 3GPP TS 32.500, “Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements”.
- [8] J. Ramiro, K. Hamied, *Self-Organizing Networks: Self-Planning, Self-Optimization and Self-Healing for GSM, UMTS and LTE*. John Wiley & Sons, Nov 2011.
- [9] T. Nielsen, J. Wigard, *LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency*. John Wiley & Sons, 2012.
- [10] 4G Americas, “The benefits of SON in LTE: Self-optimizing and self-organizing networks,” Dic 2009.
- [11] A. Lobinger, S. Stefanski, T. Jansen, I. Balan, “Load balancing in downlink LTE self-optimizing networks,” *IEEE 71st Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, May 2010.



- [12] R. Kwan, R. Arnott, R. Paterson, R. Trivisonno, M. Kubota, “On mobility load balancing for LTE systems,” *IEEE 72nd Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, Sep 2010.
- [13] [Online]. Disponible en: [www.smallcellforum.org](http://www.smallcellforum.org). Consultado el 4 de Junio de 2015.
- [14] 3GPP TS 23.401, “Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)”.
- [15] R. A. Comes, *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Fundación Vodafone España, 2010.
- [16] Agilent, *3GPP Long Term Evolution: System Overview, Product Development and Test Challenges*. Application Note, 2009.
- [17] 3GPP TS 36.101, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception”.
- [18] S. Sesia, M. Baker, I. Toufik, *LTE, the UMTS long term evolution: from theory to practice*. Wiley, 2009.
- [19] 3GPP TS 36.133, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA); Requirements for Support of Radio Resource Management”.
- [20] 3GPP TS 36.304, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA); Medium Access Control (mac) protocol specification”.
- [21] 3GPP TS 36.300, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN); Overall description”.
- [22] J. Kojima, K. Mizoe, “Radio mobile communication system wherein probability of loss of calls is reduced without a surplus of base station equipment,” U.S. Patent 4435840, Mar 1984.
- [23] C. Saraydar, A. Yener, “Adaptive cell sectorization for CDMA systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 19, no. 6, pp. 1041–1051, Jun 2001.
- [24] N. Papaoulakis, D. Nikitopoulos, S. Kyriazakos, “Practical radio resource management techniques for increased mobile network performance,” *12th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, Jun 2003.
- [25] V. Wille, S. Pedraza, M. Toril, R. Ferrer, J. Escobar, “Trial results from adaptive hand-over boundary modification in GERAN,” *Electronics Letters*, vol. 39, no. 4, pp. 405–407, Feb 2003.
- [26] S. Kourtis, R. Tafazolli, “Adaptive handover boundaries: a proposed scheme for enhanced system performance,” *51st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 3, pp. 2344–2349, Jul 2000.

- [27] R. Nasri, Z. Altman, H. Dubreil, Z. Nouir, “WCDMA downlink load sharing with dynamic control of soft handover parameters,” *63rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 942–946, May 2006.
- [28] R. Nasri, Z. Altman, “Handover adaptation for dynamic load balancing in 3gpp long term evolution systems,” *5th Int. Conf. on Advances in Mobile Computing and Multimedia*, vol. 230, pp. 145–154, Ene 2007.
- [29] P. Muñoz, R. Barco, I. De la Bandera, M. Toril, S. Luna-Ramírez, “Optimization of a fuzzy logic controller for handover-based load balancing,” *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, May 2011.
- [30] T. Chandra, W. Jeanes, H. Leung, “Determination of optimal handover boundaries in a cellular network based on traffic distribution analysis of mobile measurement reports,” *47th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 1, pp. 305–309, May 1997.
- [31] J. Steuer, K. Jobmann, “The use of mobile positioning supported traffic density measurements to assist load balancing methods based on adaptive cell sizing,” *13th IEEE Int. Symp. on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 1, pp. 339–343, Sep 2002.
- [32] M. Toril, V. Wille, “Optimization of Handover Parameters for Traffic Sharing in GERAN,” *Wireless Personal Communications*, vol. 47, no. 3, pp. 315–336, Nov 2008.
- [33] Z. Altman, C. Balageas, P. Beltran, Y. Ben Ezra, E. Formet, J. Hamalainen, O. Marcé, E. Mutafungwa, S. Perales, M. Ran, Z. Zheng, “Femtocells: The homesnet vision,” *21st IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) Workshops*, pp. 139–144, Sep 2010.
- [34] [Online]. Disponible en: <http://www.ict-befemto.eu>. Consultado el 4 de Junio de 2015.
- [35] G. Vivier, M. Kamoun, Z. Becvar, E. de Marinis, Y. Lostanlen, A. Widiawan, “Femtocells for next-g wireless systems: the freedom approach,” *Future Network & Mobile Summit*, pp. 1–9, Jun 2010.
- [36] H. Claussen, L. Ho, L. Samuel, “An overview of the femtocell concept,” *Bell Labs Technical Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 221–245, 2008.
- [37] —, “Self-optimization of coverage for femtocell deployments,” in *Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, pp. 278–285, Abr 2008.
- [38] H. Claussen, F. Pivit, “Femtocell coverage optimization using switched multi-element antennas,” *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, Jun 2009.
- [39] Z. Becvar, P. Mach, “Adaptive hysteresis margin for handover in femtocell network,” *6th International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC)*, pp. 256–261, Sep 2010.

- [40] A. Tyrrell, F. Zdarsky, E. Mino, M. Lopez, “Use cases, enablers and requirements for evolved femtocells,” *73rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–5, May 2011.
- [41] D. Lopez-Perez, A. Valcarce, G. de la Roche, J. Zhang, “OFDMA femtocells: A roadmap on interference avoidance,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 9, pp. 41–48, Sep 2009.
- [42] D. López-Pérez, X. Chu, A. Vasilakos, H. Claussen, “Minimising cell transmit power: towards self-organized resource allocation in OFDMA femtocells,” *Special Interest Group on Data Communications (SIGCOMM)*, pp. 410–411, Ago 2011.
- [43] A. Galindo, L. Giupponi, M. Dohler, “Cognition and docition in OFDMA-based femtocell networks,” *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–6, Dic 2010.
- [44] S. Namal, K. Ghaboosi, M. Bennis, A. MacKenzie, M. Latva-aho, “Joint admission control and interference avoidance in self-organized femtocells,” *44th Conf. on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, pp. 1067–1071, Nov 2010.
- [45] M. Bennis, L. Giupponi, E. Diaz, M. Lalam, M. Maqbool, E. Strinati, A. De Domenico, M. Latva-aho, “Interference management in self-organized femtocell networks: The BeFEMTO approach,” *2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology (Wireless VITAE)*, pp. 1–6, Mar 2011.
- [46] S. Barbarossa, S. Sardellitti, A. Carfagna, P. Vecchiarelli, “Decentralized interference management in femtocells: A game-theoretic approach,” *5th Int. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom)*, Jun 2010.
- [47] I. Ashraf, H. Claussen, L. Ho, “Distributed radio coverage optimization in enterprise femtocell networks,” *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, May 2010.
- [48] K. Han, Y. Choi, D. Kim, M. Na, S. Choi, K. Han, “Optimization of femtocell network configuration under interference constraints,” *7th Int. Symp. on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT)*, pp. 1–7, Jun 2009.
- [49] B. Eklundh, “Channel Utilization and Blocking Probability in a Cellular Mobile Telephone System with Directed Retry,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 34, no. 4, pp. 329–337, Abr 1986.
- [50] M. Toril, R. Ferrer, S. Pedraza, V. Wille, J. J. Escobar, “Optimization of half-rate codec assignment in GERAN,” *Wireless Personal Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 321–331, Ago 2005.

- [51] R. Rathgeber, “Spatial traffic distribution in cellular networks,” *48th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 3, pp. 1994–1998, May 1998.
- [52] S. Almeida, J. Queijo, L. Correia, “Spatial and temporal traffic distribution models for GSM,” *50th IEEE Vehicular Technology Conference, (VTC)*, vol. 1, pp. 131–135, Sep 1999.
- [53] 3GPP TS 36.331, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA); Radio Resource Control; Protocol specification”.
- [54] T. Nielsen, J. Wigard, *Performance Enhancements in a Frequency Hopping GSM Network*. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [55] H. Holma, A. Toskala, *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 2002.
- [56] T. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. McGraw-Hill, 1995.
- [57] “D1.1.2. WINNER II channel models. part II. radio channel measurement and analysis results. v1.0,” WINNER II IST project, Tech. Rep., 2007.
- [58] ETSI TR 101 112 V3.2.0, “Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS,” Abr 1998.
- [59] L. Kaelbling, M. Littman, A. Moore, “Reinforcement learning: a survey,” *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 4, pp. 237–285, 1996.
- [60] M. R. Garey, D. S. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., 1979.
- [61] H. Anderson, J. McGeehan, “Optimizing microcell base station locations using simulated annealing techniques,” *IEEE 44th Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 858–862, Jun 1994.
- [62] C. Lee, H. Kang, “Cell planning with capacity expansion in mobile communications: a tabu search approach,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 5, pp. 1678–1691, Sep 2000.
- [63] A. J. Nebro, F. Chicano, F. Luna, “Optimal antenna placement using a new multi-objective CHC algorithm,” *6th International Conference on Numerical Methods and Applications*, 2007.
- [64] L. Raisanen, R. Whitaker, “Comparison and evaluation of multiple objective genetic algorithms for the antenna placement problem,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 10, no. 1-2, pp. 79–88, Feb 2005.
- [65] M. Nawrocki, T. Wieckowski, “Optimal site and antenna location for UMTS output results of 3G network simulation software,” *14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, vol. 3, pp. 890–893, 2002.

- [66] J. Niemelä, J. Lempiäinen, “Impact of base station locations and antenna orientations on UMTS radio network capacity and coverage evolution,” *IEEE 6th Int. Symp. on Wireless Personal Multimedia Communications Conference*, vol. 2, pp. 82–86, 2003.
- [67] E. Amaldi, A. Capone, F. Malucelli, “Planning UMTS base station location: optimization models with power control and algorithms,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 5, pp. 939–952, Sep 2003.
- [68] L. Nagy, L. Farkas, “Indoor base station location optimization using genetic algorithms,” *IEEE 11th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 2, pp. 843–846, 2000.
- [69] Z. Ji, T. K. Sarkar, B.-H. Li, “Methods for optimizing the location of base stations for indoor wireless communications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 10, pp. 1481–1483, Oct 2002.
- [70] L. Nagy, Z. Szalay, “Global optimization of indoor radio coverage,” *Conference Proceedings ICECom*, pp. 1–4, Sep 2010.
- [71] S. F. Rodd, A. Prof, A. H. Kulkarni, “Optimization algorithms for access point deployment in wireless networks,” *Journal of Computer Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 24–26, Abr 2009.
- [72] J. Wong, A. Mason, M. Neve, K. Sowerby, “Base station placement in indoor wireless systems using binary integer programming,” *IEE Proceedings Communications*, vol. 153, no. 5, pp. 771–778, Oct 2006.
- [73] Y. Ngadiman, Y. Chew, B. Yeo, “A new approach for finding optimal base stations configuration for CDMA systems jointly with uplink and downlink constraints,” *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 4, pp. 2751–2755, Sep 2005.
- [74] L. Pujji, K. Sowerby, M. Neve, “A new algorithm for efficient optimisation of base station placement in indoor wireless communication systems,” *7th Annual Communication Networks and Services Research Conference*, pp. 425–427, May 2009.
- [75] M. Talau, E. Wille, H. Lopes, “Solving the base station placement problem by means of swarm intelligence,” *IEEE Symposium on Computational Intelligence for Communication Systems and Networks*, pp. 39–44, Abr 2013.
- [76] L. Pujji, K. Sowerby, M. Neve, “Development of a hybrid algorithm for efficient optimisation of base station placement for indoor wireless communication systems,” *Wireless Personal Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 471–486, Mar 2013.
- [77] S. Wang, W. Guo, T. O’Farrell, “Optimising femtocell placement in an interference limited network: Theory and simulation,” *IEEE 76th Vehicular Technology Conference (VTC)*, pp. 1–6, Sep 2012.

- [78] J. Liu, Q. Chen, H. Sherali, “Algorithm design for femtocell base station placement in commercial building environments,” *IEEE INFOCOM*, pp. 2951–2955, Mar 2012.
- [79] C. Sharma, Y.F. Wong, W.S. Soh, W.C. Wong, “Access point placement for fingerprint-based localization,” *IEEE International Conference on Communication Systems*, pp. 238–243, Nov 2010.
- [80] K. Farkas, A. Huszák, G. Gódor, “Optimization of Wi-Fi access point placement for indoor localization,” *IEEE 6th Symp. On Wireless Personal Multimedia Com. Conference*, vol. 1, pp. 28–33, Jul 2013.
- [81] J. K. L. Wong, M. Neve, K. Sowerby, “Optimisation of a multi-code CDMA in-building communication system,” *IEEE 63rd Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 2, pp. 846–850, May 2006.
- [82] R. D. García Morales, M. Toril, J. M. Ruiz-Aviles, S. Luna Ramírez, “Algoritmos de Planificación Estática de Frecuencias en Femtoceldas LTE,” *XXIX Simposio de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI), Valencia (España)*, Sep 2014.
- [83] T. Hytönen, “Optimal wrap-around network simulation,” Helsinki University of Technology Institute of Mathematics, Tech. Rep., 2001.
- [84] NGMN, “Radio Access Performance Evaluation Methodology, Version 1.0,” 2008.
- [85] J. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, Pentech, 1992.
- [86] W. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, Wiley, 1974.
- [87] T. Sorensen, P. Mogensen, F. Frederiksen, “Extension of the ITU channel models for wideband (OFDM) systems,” *IEEE 62nd Vehicular Technology Conference (VTC)*, vol. 1, pp. 392–396, Sep 2005.
- [88] 3GPP TS 25.892, “Feasibility study for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement”.
- [89] 3GPP R1-061506, “System Analysis of the Impact of CQI Reporting Period in DL SIMO OFDMA”.
- [90] E. Tuomaala, H. Wang, “Effective SINR approach of link to system mapping in OFDM/multi-carrier mobile network,” *2nd International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems*, Nov 2005.
- [91] J. C. Ikuno, M. Wrulich, M. Rupp, “Performance and Modeling of LTE HARQ,” *International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA)*, pp.130–135, 2009.
- [92] 3GPP R1-040500, “OFDM-HSDPA System level simulator calibration”.

- [93] 3GPP TS 36.521, “E-UTRA; UE conformance specification; radio transmission and reception; Part 1: Conformance testing”.
- [94] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, M. Rupp, “Simulating the long term evolution physical layer,” *European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Ago 2009.