

Universidad de Málaga  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación



## RESUMEN DE TESIS DOCTORAL

Self-tuning Algorithms for the Assignment of Packet  
Control Units and Handover Parameters in GERAN

Autor:

MATÍAS TORIL GENOVÉS

Directores:

VOLKER WILLE  
IÑIGO MOLINA FERNÁNDEZ

Málaga, 28 de Enero de 2008

## Índice

Antecedentes	1
Estado actual	1
Objetivos de la Investigación	3
Metodología de Trabajo y Diseño Experimental	4
Conclusiones	4
Originalidad de la tesis	7
Resultados obtenidos	8
Aplicabilidad práctica e interés industrial	10
Referencias bibliográficas	12
Anexo: Publicaciones	14

## Antecedentes

En los últimos años, las redes de telefonía móvil han experimentado cambios sustanciales para hacer frente a la demanda creciente de servicios de comunicaciones móviles. Como resultado, el tamaño y la complejidad de estas redes ha crecido notablemente, dificultando mucho las tareas de gestión de red. En el pasado, los operadores han solventado este problema aumentando su plantilla, pero, aun así, es difícil conseguir una configuración óptima de la red debido a su tamaño y heterogeneidad. Por ello, los operadores demandan herramientas automáticas de optimización de red. Esta necesidad es más apremiante en tecnologías maduras, como *GSM-EDGE Radio Access Network* (GERAN), donde los operadores desean reducir los costes de operación al máximo.

El problema de la optimización de una red celular puede solventarse de diferentes maneras. Por un lado, los fabricantes de equipamiento desarrollan nuevos algoritmos de gestión de recursos radio (*Radio Resource Management*, RRM), que extienden la funcionalidad de la red. Estos algoritmos RRM son capaces de modificar los parámetros de red en tiempo real. Por otro lado, los operadores desarrollan métodos de optimización de parámetros basados en el equipamiento disponible, para amortizar la inversión ya realizada. Con este objetivo, se recopilan estadísticas de los indicadores de rendimiento en el sistema de gestión de red (*Network Management System*, NMS). A partir de estos datos, se elabora una propuesta de cambio de parámetros, que se descarga posteriormente en la red. Es obvio que el desarrollo de nuevos algoritmos RRM pierde interés conforme se consolida una tecnología radio. Como los operadores dejan de invertir en tecnologías con un horizonte limitado, los fabricantes desvían su atención hacia tecnologías emergentes. En estas condiciones, la replanificación de parámetros desde la NMS es la única alternativa para mejorar redes de tecnologías maduras. Desafortunadamente, los métodos de replanificación automática existentes en la actualidad suelen ser muy limitados. Como resultado, los operadores terminan ajustando sus redes de manera manual y, por ello, rara vez se considera la optimización de una red ya desplegada.

Esta tesis aborda el problema de la replanificación automática de redes GERAN. El estudio se centra en los principales procesos encargados de la gestión de la movilidad: la (re)selección de celda y el traspaso. Para mejorar el rendimiento de la reelección de celda, se propone mejorar la asignación de celdas a unidades de control de paquetes. De manera paralela, se propone el ajuste de los parámetros de traspaso para solventar problemas de congestión localizada en la red.

## Estado actual

A continuación se describe el estado de la investigación y la tecnología de los problemas abordados en esta tesis. Por claridad, ambos problemas se tratan de forma independiente.

### *a) Optimización de la asignación de unidades de control de paquetes en GERAN*

En GERAN, un controlador de estación base (*base station controller*, BSC) contiene un conjunto de unidades de control de paquetes (*packet control units*, PCUs), encargadas del control del tráfico de paquetes de datos. Cada celda de la BSC se asocia a una PCU durante la fase de planificación. Esta asignación de celdas a PCUs influye de manera decisiva en el retardo de reelección de celda cuando un usuario se desplaza. Este retardo es crítico para los servicios de transmisión de paquetes, ya que, durante la reelección, el terminal es incapaz de enviar o recibir datos, y en las redes actuales, basadas en *General Packet Radio Service* (GPRS), no existen mecanismos para ofrecer servicios con restricciones de retardo [1]. Las pruebas de campo han demostrado que el retardo de reelección de celda es mucho mayor cuando las celdas origen y destino están asignadas a diferentes PCUs [2]. Por ello, el plan de PCUs debe minimizar el número de usuarios que cambian de PCU.

Desde el punto de vista teórico, la asignación de celdas a PCUs se puede formular como un problema de partición de grafos [3]. En esta aproximación, la red se modela por un grafo, cuyos

vértices y aristas representan las celdas y sus relaciones de adyacencia, respectivamente. La partición del grafo en trozos (o subdominios) refleja la asignación de celdas a PCUs. Cuando se parte el grafo, se trata de minimizar el peso total de las aristas que unen vértices en diferentes subdominios, a la vez que se distribuye el peso de los vértices equitativamente entre los subdominios. En el caso de una red celular, esto equivale a minimizar el número de usuarios que se desplazan entre celdas asignadas a diferentes PCUs, manteniendo la carga de las PCUs lo más equilibrada posible.

La forma más simple de resolver el problema de partición es la enumeración del espacio completo de soluciones, pero esta estrategia sólo es válida para grafos de tamaño trivial. Como alternativa, la mayoría de los métodos exactos tratan de reducir el espacio de soluciones enumerado de forma explícita. La estrategia más utilizada es la formulación del problema mediante un modelo de programación lineal entera (*Integer Linear Programming*, ILP) [4], que se puede resolver con el algoritmo de ramificación y corte [5]. A pesar de los intentos por mejorar su eficiencia, los métodos exactos siguen siendo hoy en día muy costosos computacionalmente. Por este motivo, se han propuesto numerosos algoritmos heurísticos para encontrar soluciones aproximadas de manera eficiente [3]. El algoritmo de refinamiento local *Kernighan-Lin* [6] es el más utilizado en la bibliografía. Otros métodos prometedores son el refinamiento multinivel [7][8] y las técnicas multiarreglo adaptativas [9][10]. El interés por estos métodos ha crecido en los últimos años, por sus aplicaciones en el ámbito de la supercomputación, el diseño de circuitos integrados y la interconexión de redes de ordenadores. En el contexto de las redes celulares, estos métodos se han utilizado en la asignación de celdas a centrales de conmutación [11][12][13] y áreas de localización [14][15][16][17] durante la fase de diseño de la red. Sin embargo, el problema de la planificación de PCUs no se ha tratado en la literatura, presentando diferencias significativas que justifican su estudio diferenciado. Asimismo, la mayoría de los métodos anteriores han sido concebidos para el diseño de una red partiendo de cero. Por ello, no se tienen en cuenta aspectos operacionales, como la utilización de estadísticas de red, la facilidad para comprobar visualmente las soluciones o el número de cambios producidos en la red. La experiencia ha demostrado que los métodos clásicos no son directamente aplicables.

En cuanto al estado de la tecnología, la asignación de celdas a PCUs en los equipos actuales se puede llevar a cabo de forma manual o automática, siendo ésta decisión del operador. Sin embargo, las limitaciones del método automático hacen que los operadores suelen utilizar el procedimiento manual, donde la diversidad de los datos de configuración y las estadísticas de red obligan a dar por buenas soluciones ineficaces. Por la misma razón, casi nunca se considera la optimización de un plan existente y los cambios de un plan de PCUs se restringen a la inclusión de una nueva celda o PCU. Como resultado, el número de reelecciones de celdas entre PCUs es alto y la carga se distribuye de manera irregular entre PCUs, lo que produce un deterioro de la calidad de los servicios de datos.

#### *b) Ajuste de parámetros de traspaso para alivio de congestión en GERAN*

Las fluctuaciones del tráfico de red se manejan con algoritmos RRM de control de congestión, que reaccionan de manera instantánea reduciendo temporalmente la carga de tráfico. Entre los más utilizados en GERAN se encuentran la codificación a velocidad mitad dinámica [18], el reintento directo [19] y el reparto dinámico de carga [20]. Estos procesos, concebidos para hacer frente a la aleatoriedad del proceso de llamada, son incapaces de solventar la congestión causada por la concentración espacial del tráfico. Al igual que otros procesos dinámicos, estos procesos son tendentes a la inestabilidad, lo que fuerza el ajuste de sus parámetros internos de manera conservadora, con la correspondiente pérdida de rendimiento. Por ello, los problemas de congestión permanente se resuelven a largo plazo con estrategias de replanificación, como la extensión del número de transceptores o la división de celdas. A corto plazo, la modificación del área de servicio de las celdas es la única solución para aquellas celdas que no pueden actualizarse rápidamente o simplemente no justifican la inclusión de nuevos recursos (p.ej., congestión por tráfico estacional).

Para modificar el área de servicio de una celda, se han propuesto diferentes técnicas. Un

primer grupo modifica parámetros físicos de la estación base, tales como la potencia transmitida [21] o el patrón de radiación de la antena [22][23]. Como estas técnicas requieren acciones de mantenimiento, se utilizan en contadas ocasiones. Como alternativa, un segundo grupo modifica parámetros de algoritmos RRM, que es mucho más inmediato. Entre ellas destaca el ajuste de los parámetros de traspaso por su simplicidad y efectividad [24][25][26][27]. Seleccionado el mecanismo de ajuste, resta decidir el algoritmo de optimización. Para solventar problemas de congestión local, se han propuesto estrategias proactivas que modelan la regulación de parámetros como un problema clásico de optimización [26][27]. Como principal ventaja frente a las estrategias reactivas, el uso de un criterio de optimización global asegura la solución óptima al problema. El proceso clave en estos métodos es el modelado de la distribución espacial de tráfico a partir de medidas de nivel de señal [26] o posicionamiento [27]. Con esta información, el problema de regulación de parámetros se modela como un problema clásico de optimización no lineal multivariable con restricciones, que se resuelve por métodos iterativos [4]. Estos métodos proactivos se deben ejecutar en la NMS, donde es posible construir modelos analíticos de la red a partir de medidas estadísticas. Lamentablemente, las medidas necesarias para la construcción de estos modelos analíticos no suelen estar disponibles para el operador. Por ello, en la mayoría de los casos, el algoritmo de optimización debe interactuar directamente con la red real, lo que limita las posibilidades de experimentación. Como resultado, el problema de ajuste de los márgenes de traspaso suele resolverse mediante métodos heurísticos. Por simplicidad, la mayoría de los operadores suelen fijar los parámetros a valores por defecto. El reajuste posterior se lleva a cabo manualmente, después de un arduo trabajo de análisis que debe realizarse celda por celda (o, incluso, adyacencia por adyacencia). En las contadas ocasiones en las que se realiza el ajuste, los operadores restringen el margen de variación de los parámetros por seguridad, lo que limita el beneficio del proceso de ajuste.

En cuanto al estado de la tecnología, los equipos de los fabricantes incluyen la mayoría de los algoritmos de control de congestión citados de manera opcional. Sin embargo, como los operadores tienen que pagar cantidades importantes por esta funcionalidad adicional, muy pocos se utilizan en la práctica. Mientras que el reintento directo es de uso común, dada su simplicidad y efectividad, el reparto dinámico de carga es poco común por su elevado coste y dificultad para conseguir un funcionamiento estable. Con ello, la optimización de parámetros desde la NMS queda como único recurso para aquellas celdas en las que el reintento directo no solventa los problemas de congestión.

La llegada de las primeras herramientas automáticas de planificación de red ha favorecido el desarrollo de métodos de optimización más sofisticados basados en la NMS. Con estos métodos, se persigue aprovechar al máximo las posibilidades de ajuste de los parámetros de traspaso, definidos a nivel de adyacencia. Para favorecer su puesta en funcionamiento, los algoritmos de ajuste de esta tesis emulan el proceso de razonamiento del operador, implementándose como sistemas basados en reglas. Los sistemas de inferencia difusa (o lógica borrosa) [28] son especialmente indicados para el diseño de este tipo de controladores, donde ya se dispone de la experiencia de un operador y se ha de manejar información imprecisa, flexible o incierta.

## Objetivos de la Investigación

Los objetivos de esta tesis son:

- a) desarrollar métodos de optimización de la asignación de celdas a PCUs para mejorar el rendimiento de los servicios por conmutación de paquetes en GERAN, y
- b) desarrollar métodos de optimización de parámetros de traspaso para solventar problemas de congestión local en servicios por conmutación de circuitos en GERAN.

Como restricción de partida, todos los métodos deben basarse en estadísticas disponibles en la NMS, interactuando con la red por medio de archivos.

## Metodología de Trabajo y Diseño Experimental

En los objetivos anteriores se aprecia que esta tesis cubre dos problemas diferentes, que podrían haberse tratado de manera completamente independiente. No obstante, se ha realizado un esfuerzo por dar a ambos problemas un tratamiento unificado, siguiendo la misma metodología de trabajo.

El trabajo comenzó con la formulación del problema, basándose en una descripción cualitativa del mismo. En esta tesis se pretendía solventar problemas que afrontan los operadores durante la replanificación de sus redes. Por ello, la formulación inicial del problema en términos cualitativos la realizó directamente el operador. Consecuentemente, tanto los parámetros optimizados como los principales criterios de rendimiento fueron seleccionados por el operador.

A partir de esta descripción general, el problema se formuló analíticamente, realizando, cuando fue necesario, las pertinentes simplificaciones. Esta formulación inicial permitió identificar el tipo de problema solventado, facilitando la búsqueda de métodos de solución a problemas similares en otras áreas de conocimiento. Asimismo, la formulación analítica permitió identificar las características de la solución óptima y, si el modelo del problema era preciso, plantear métodos de resolución exacta.

Para evitar esfuerzos innecesarios, el estudio se centró inicialmente en métodos simples, que pudieran probarse de manera rápida en una red real. El objetivo de estas primeras pruebas de campo era, por un lado, evaluar la sensibilidad de la red a la modificación de estos parámetros, y, por otro lado, poner de manifiesto la ineficacia de los métodos actuales, disponiendo de una cota inferior de la ganancia obtenida por la optimización. Sólo cuando se demostró que un método simple podía tener un impacto significativo en el rendimiento de la red, se consideraron métodos más sofisticados. Esto justifica que la validación de los métodos en esta tesis se iniciara con una prueba de campo de un método muy simple, y no con la prueba de métodos más sofisticados sobre un modelo simplificado del sistema. Durante el desarrollo de los algoritmos probados en esta tesis, se tuvieron en cuenta las limitaciones de los equipos existentes y las restricciones impuestas por el operador, imprescindible si se pretende probar los algoritmos en una red real.

Tras demostrar el potencial de las técnicas propuestas, el estudio se centró en métodos más sofisticados. La validación de estos métodos se realizó sobre modelos analíticos construidos a partir de medidas extraídas de la red o, en su defecto, sobre simulaciones en entornos realistas. Idealmente, la evaluación final debería haberse realizado sobre la red real. Sin embargo, los operadores son reticentes a probar algoritmos complejos que modifiquen de manera automática parámetros que tienen gran impacto sobre la red. Aun así, se espera que los resultados obtenidos en los casos de prueba se mantengan en la red real, porque (a) los casos de prueba son representativos de la realidad, especialmente en el modelo analítico construido con medidas de red, (b) la técnica básica se ha probado previamente en una red real, y (c) los algoritmos propuestos son bastante intuitivos.

## Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones de esta tesis para los dos problemas abordados.

### *a) Optimización de la asignación de PCUs en GERAN*

En este trabajo se ha propuesto un modelo analítico de la asignación de PCUs basado en la formulación clásica del problema de partición de grafos. Para su resolución, se han propuesto un método exacto y un método heurístico. El método exacto utiliza el algoritmo de ramificación y corte para resolver un modelo ILP del problema. Este primer método permite obtener la solución óptima a costa de un gran tiempo de ejecución. El método heurístico combina el algoritmo de refinamiento multinivel con restricciones de conectividad y técnicas multiarreglo adaptativas. Este segundo método obtiene de manera eficiente soluciones con una baja tasa de reelección entre

PCUs, que además cumplen que las celdas de una PCU cubren un área geográfica continua. Esta propiedad facilita la comprobación visual de la solución sobre un mapa por parte del operador. La experiencia ha demostrado que las soluciones que no cumplen esta condición son descartadas por el operador, independientemente de la mejora de rendimiento que producirían en la red.

Para demostrar la importancia del problema, se ha realizado una prueba de campo en una BSC real. Basándose en una campaña de medidas sobre vehículo, se ha demostrado que la interrupción del servicio producida por la reelección de celda es mucho mayor cuando se realiza entre celdas de diferentes PCUs que cuando se realiza entre celdas de una misma PCU. Concretamente, la interrupción media del servicio para el primer caso es más del doble del valor que en el segundo caso, pudiendo superar en algunos casos los 10 segundos. Este resultado aconseja minimizar el número de reelecciones entre celdas de distintas PCUs para mejorar el rendimiento de los servicios de transmisión de paquetes. Asimismo, se ha puesto de manifiesto que la configuración manual realizada por el operador dista mucho de ser óptima. La prueba ha demostrado que un algoritmo de partición de grafos muy básico puede reducir el tiempo medio de reelección de celda en un 30% al reducir el intercambio de usuarios entre PCUs.

Como la prueba anterior solo cubrió un área limitada, se ha realizado un análisis exhaustivo sobre un conjunto de grafos construidos a partir de datos de una red real. El escenario analizado corresponde al área cubierta por 61 BSCs. Para la construcción de los grafos, se han utilizado las estadísticas de traspaso de los servicios de voz, en ausencia de estadísticas de movilidad de los usuarios de los servicios de transmisión de paquetes. Asumiendo que la movilidad de los usuarios es similar con y sin conexión permanente a la red, el error cometido debería ser relativamente pequeño. El estudio preliminar ha puesto de manifiesto que estos grafos reales son más pequeños, pero más complejos que los de otras aplicaciones, lo que justifica el diseño de algoritmos más sofisticados. Durante el análisis, los métodos propuestos se han comparado con métodos clásicos. Los resultados confirman que el rendimiento actual de la red puede mejorarse notablemente, demostrando la ineficacia del método actual del operador.

El análisis del método exacto, basado en el algoritmo de ramificación y corte, ha demostrado la eficiencia del modelo ILP propuesto, frente a otros descritos en la bibliografía. El método exacto obtiene una tasa promedio de reelección de celda entre PCUs un 82% menor que la actual configuración del operador y un 15% menor que la obtenida por el mejor método heurístico. Aunque el tiempo de ejecución del método exacto impide que se pueda aplicar diariamente, éste puede utilizarse durante la fase de planificación de red, donde las exigencias temporales son menores. Con la disposición de códigos más eficientes y ordenadores de mayor capacidad de cálculo, este método podría convertirse en el futuro en una opción válida para la fase de operación.

Entre los métodos heurísticos, el método que combina el algoritmo de refinamiento multinivel con la técnica multiarranque adaptativa es el que obtiene el mejor compromiso entre calidad de solución y tiempo de ejecución. Concretamente, el método consigue reducir la tasa de reelección de celda entre PCUs de la red actual en un 80%. Al mismo tiempo, el método propuesto reduce a la mitad el desequilibrio de carga entre PCUs en la solución actual, mientras que reduce el número de subdominios fragmentados en un orden de magnitud. Los resultados demuestran que el método heurístico propuesto supera al método multinivel clásico a costa de un ligero incremento del tiempo de ejecución. A la luz de estos resultados, se puede concluir que el método heurístico propuesto es un firme candidato para la replanificación de la asignación de celdas a PCUs que deben realizar los operadores de GERAN como parte de su rutina diaria.

#### *b) Ajuste de parámetros de traspaso para alivio de congestión en GERAN*

El problema del ajuste de parámetros se ha formulado como un problema de optimización multiobjetivo. En esta formulación, las principales variables de decisión son los márgenes de traspaso y los principales criterios de rendimiento son las tasas totales de bloqueo y pérdida de conexión en la red. Un caso de prueba sencillo sobre un simulador dinámico de red ha demostrado la dificultad de

tratar el modelo de forma analítica, al tratarse de un problema de optimización no lineal multivariable de gran tamaño muy dependiente del entorno. Aun así, estos experimentos han demostrado el potencial de esta técnica para redistribuir el tráfico en la red.

Se han propuesto diversos métodos heurísticos para ajustar parámetros de traspaso basándose en estadísticas de red actualmente disponibles en GERAN. En un primer método, se ajustan los parámetros del algoritmo de reintento directo para evitar el envío de usuarios hacia celdas interferidas por la celda original. El segundo método equilibra el tráfico en las celdas de la red siguiendo una estrategia de difusión basada en el ajuste de los márgenes de traspaso a nivel de adyacencia. El tercer método optimiza las restricciones de nivel de señal a nivel de adyacencia. Finalmente, se propone un método que combina todas las estrategias anteriores para mejorar la capacidad de resolver problemas de congestión sin causar problemas de calidad en la red. El algoritmo presentado, realizado mediante lógica borrosa, optimiza los márgenes y las restricciones de nivel de traspaso conjuntamente, de manera que estas restricciones se refuerzan en aquellas adyacencias en las que los márgenes pasan a tener valores negativos, como consecuencia del proceso de balance. Asimismo, los márgenes de traspaso se restringen en aquellas adyacencias en las que las celdas origen y destino comparten frecuencias en sus transceptores. Además, se incluye un mecanismo de adaptación de la ganancia de lazo para acelerar el proceso de convergencia, sin producir problemas de inestabilidad.

Para demostrar el potencial del ajuste de los márgenes de traspaso, se ha realizado una prueba de campo sobre una BSC real. En esta prueba se trataba de reducir el bloqueo de llamadas producto de la política de tarificación del operador. Los resultados han demostrado que el bloqueo en la red se puede reducir a la mitad con una simple estrategia de difusión del tráfico entre celdas adyacentes.

Como la prueba de campo solo cubrió un área geográfica limitada, se ha realizado un análisis exhaustivo sobre un caso de prueba en un simulador dinámico de red. El escenario simulado modela una situación extrema en la que las celdas sobrecargadas están próximas entre sí. Durante el análisis, los métodos propuestos se han comparado con técnicas de alivio de congestión clásica.

El análisis preliminar ha puesto de manifiesto las limitaciones de las técnicas clásicas para solventar problemas de congestión local, sobre todo cuando se utilizan esquemas de reutilización de frecuencia ajustados. Aunque el reintento directo es una técnica con grandes posibilidades, este mecanismo puede producir un deterioro de la calidad de la red inaceptable si las restricciones de nivel de señal no se ajustan de manera apropiada. Por la misma razón, la estrategia de balance de tráfico por difusión básica, basada en el ajuste lento de los márgenes de traspaso, no proporciona buenos resultados cuando los márgenes de traspaso pasan a ser negativos. En el caso de prueba, esta última estrategia triplica la tasa de pérdida de enlace, reduciendo la tasa de bloqueo únicamente en un 30%. Optimizando las restricciones de nivel de traspaso en función de la interferencia de la celda destino se pueden reducir enormemente los problemas de calidad de conexión. Este incremento de las restricciones de traspaso es mucho más eficaz si se realiza únicamente en aquellas adyacencias con márgenes de traspaso negativos. En el caso de prueba, el algoritmo borroso de ajuste de márgenes y restricciones de nivel consigue la misma reducción de la tasa global de bloqueo que la estrategia clásica, con la mitad de incremento de la tasa de pérdida de conexión.

El principal inconveniente de modificar los márgenes de traspaso es el incremento de señalización asociado al mayor número de traspasos. En el caso de prueba, el número de traspasos es 5 veces mayor si se aplica el método clásico de optimización de los márgenes de traspaso. Este problema se puede paliar regulando los parámetros del algoritmo de reelección de celda para sincronizar el área de dominancia de cada celda durante el proceso de reelección de celda con la definida por el traspaso. Con este método, el número de traspasos tras el ajuste de los márgenes de traspaso se reduce a la mitad.

A partir de estos resultados, se concluye que el método propuesto, que ajusta parámetros en los algoritmos de reelección de celda, reintento directo y traspaso, solventa los problemas de congestión local con los recursos disponibles. Aun así, la ganancia obtenida en un entorno real dependerá de la distribución espacial de tráfico, las condiciones de propagación y los recursos en la red.

## Originalidad de la tesis

A nivel científico, las principales contribuciones de esta tesis se resumen a continuación.

### a) *Optimización de la asignación de PCUs en GERAN*

- a.1) Se ha formulado por primera vez el problema de las asignación de PCUs como un problema de partición de grafos. La formulación analítica presentada ha permitido resolver el problema de manera exacta.
- a.2) Los resultados de la prueba de campo preliminar han demostrado las limitaciones de la aproximación actual del operador y el potencial de un algoritmo de partición de grafos básico, sobre un área limitada. Con ello, se ha justificado por primera vez la necesidad de mejorar la asignación de celdas a PCUs.
- a.3) Se han adaptado varios métodos clásicos de partición de grafos, concebidos en otros ámbitos, al entorno celular. Los cambios afectan tanto a la formulación del problema, como a las técnicas de resolución. A partir de ellos, se han propuesto dos métodos novedosos de resolución del problema: (a) un método exacto, basado en la aplicación del algoritmo de ramificación y planos de corte tradicional sobre un modelo ILP mejorado del problema, (b) un método heurístico, basado en la combinación de dos técnicas consideradas hasta la fecha de manera independiente: el refinamiento multinivel y las técnicas multiarranque adaptativas. Como extensión del método, se han considerado las restricciones de conectividad entre celdas de un subdominio y la asignación de celdas de un mismo emplazamiento a la misma PCU, que no han sido consideradas en los métodos clásicos concebidos en el ámbito de la supercomputación.
- a.4) Existen diversos problemas en una red celular que se pueden modelar como un problema de partición de grafos. Así, en la bibliografía de redes celulares se han estudiado problemas de agrupamiento con ciertas similitudes con el problema tratado aquí. Sin embargo, no se ha presentado hasta la fecha una comparación rigurosa de las diferentes técnicas de partición de grafos en este ámbito. Esta tesis ha presentado por primera vez los resultados de técnicas clásicas de partición de grafos, junto al algoritmo propuesto, sobre grafos construidos a partir de datos de una red celular real. El análisis ha demostrado que estos grafos presentan peculiaridades que justifican la necesidad de comprobar el rendimiento de técnicas ya validadas en otros ámbitos. Los resultados presentados se podrían extrapolar a otros problemas similares que surgen en el diseño de la jerarquía de una red celular, como es la asignación de celdas a controladores de estación base y áreas de localización.

### b) *Ajuste de parámetros de traspaso para alivio de congestión en GERAN*

- b.1) Se han identificado por primera vez las limitaciones de las técnicas clásicas de alivio de congestión para solventar problemas de congestión localizada en GERAN. Los experimentos sobre un simulador dinámico de red han mostrado que, aunque algunas de estas técnicas pueden conseguir redistribuir el tráfico en la red, producen problemas de calidad de conexión, sobre todo con esquemas de reutilización de frecuencia ajustados.
- b.2) Se han presentado los resultados de una prueba de campo, que confirman el potencial del ajuste de los márgenes de traspaso para hacer frente a la distribución irregular del tráfico en un entorno real causada por la política de tarificación del operador.
- b.3) Para resolver los problemas de los métodos clásicos, se han propuesto cinco métodos para ajustar de manera automática diferentes parámetros en los procesos de reelección de celda, reintento directo y traspaso: primero, una regla simple para regular las restricciones de nivel de señal en el reintento directo a nivel de adyacencia para evitar el

envío de usuarios hacia celdas interferidas por la celda original; segundo, un método de ajuste de los márgenes de traspaso a nivel de adyacencia para equilibrar el tráfico entre celdas adyacentes basado en un método difusivo; tercero, un método de ajuste de las restricciones de nivel en traspaso a nivel de celda basado en el cálculo de la interferencia recibida a partir de estadísticas de nivel y calidad de señal; cuarto, un método borroso de ajuste de los márgenes y restricciones de nivel de traspaso a nivel de adyacencia, basado en la diferencia de congestión entre celdas vecinas, el valor actual de los márgenes de traspaso en la adyacencia y la interferencia en la celda destino; quinto, un método de ajuste de los parámetros de compensación en el algoritmo de reelección de celda a nivel de celda para sincronizar el área de las celdas durante el primer acceso y la conexión posterior, minimizando el número de traspasos en la red.

- b.4) Se ha presentado una comparación exhaustiva de los métodos anteriores con las estrategias clásicas de alivio de congestión sobre un caso de prueba realista en un simulador dinámico de red.

Un aspecto distintivo de este trabajo es la consideración de aspectos prácticos que a menudo se omiten. Los métodos propuestos tienen en cuenta las restricciones de los equipos actuales y, por tanto, pueden implementarse sin mucho esfuerzo en una red real. Durante el diseño de los algoritmos, se consideran las restricciones del operador, prestando especial atención a la facilidad de manejo de los algoritmos y la gestión de las soluciones. Esta precaución ha permitido llevar a cabo parte del proceso de evaluación sobre redes reales.

Otro aspecto diferenciador del trabajo es su carácter multidisciplinar. En esta tesis se aplican técnicas procedentes de disciplinas tan diversas como la supercomputación (p.ej., partición de grafos, balance de carga), la investigación operativa (p.ej., programación lineal entera), la ingeniería de control (p.ej., lógica borrosa) y, por supuesto, las telecomunicaciones. Es en la adaptación de técnicas clásicas, concebidas en otros ámbitos, al entorno celular donde reside la principal novedad de esta tesis.

La publicación de un capítulo de libro, tres artículos en revistas internacionales de reconocido prestigio y, sobre todo, tres patentes internacionales avalan la originalidad del trabajo.

## Resultados obtenidos

Los principales resultados de esta tesis son:

- a) una formulación analítica del problema de la asignación de celdas a PCUs y la optimización de parámetros de traspaso en GERAN, a partir de la cual se puede derivar la solución óptima;
- b) dos pruebas de campo que justifican la necesidad de los procesos de optimización, mostrando las limitaciones del método actualmente utilizado por el operador y los beneficios de un método simple en una red real;
- c) un método exacto y un método heurístico para la asignación de celdas a PCUs en GERAN, que mejoran los métodos utilizados hasta la fecha;
- d) un método heurístico para la optimización conjunta de parámetros de reintento directo, reelección de celda y traspaso en GERAN, que solventa las limitaciones de los métodos actuales de alivio de congestión con esquemas de reutilización de frecuencias ajustados;
- e) un conjunto de rutinas que modelan los principales algoritmos de gestión de recursos radio suministrados por los fabricantes en un simulador dinámico de red GERAN;
- f) una comparación exhaustiva de los métodos propuestos frente a métodos clásicos sobre un modelo analítico construido con medidas de red y un modelo de simulación realista.

En el marco de esta tesis se han elaborado las publicaciones que se enumeran a continuación. Merece la pena destacar que todas ellas presentan resultados de esta tesis y, aunque algunas tengan fecha de publicación reciente, todas se enviaron antes de la defensa.

*a) Artículos*

- [I] V. Wille, S. Pedraza, M. Toril, R. Ferrer, J. Escobar, “Trial results from adaptive hand-over boundary modification in GERAN”, *Electronics Letters*, ISSN: 0013-5194, vol. 39, no. 4, pp. 405–407, Feb 2003.
- [II] M. Toril, V. Wille, R. Barco, “Optimization of the assignment of cells to packet control units in GERAN”, *IEEE Communications Letters*, ISSN: 1089-7798, vol. 10, no. 3, pp. 219 – 221, Mar 2006.
- [III] M. Toril, V. Wille, “Optimization of handover parameters for traffic sharing in GERAN”, *Wireless Personal Communications*, ISSN: 1022-0038, a publicar en 2008.

*b) Libros*

- [IV] M. Toril, “Self-tuning algorithms for the assignment of packet control units and handover parameters in GERAN,” Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico de la Universidad de Málaga, Tesis Doctorales, ISBN: 978-84-9747-480-1, 2007.

*c) Capítulos de libro*

- [V] R. Barco, A. Kuurne, S. Pedraza, M. Toril. V. Wille, S. Patel, M. Partanen, “Automation and optimization”, en *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Toward 3G/UMTS*, T. Halonen, J. Melero, and J. Romero, Eds., ISBN: 0-470-84457-4, John Wiley & Sons, 2002, pp. 411–475.
- [VI] R. Barco, A. Kuurne, S. Pedraza, M. Toril. V. Wille, S. Patel and M. Partanen, “Automation and optimization”, en *GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Toward 3G/UMTS (2nd edition)*, T. Halonen, J. Melero, and J. Romero, Eds., ISBN: 0-470-86694-2, John Wiley & Sons, 2003, pp. 467–512.

*d) Conferencias*

- [VII] M. Toril, S. Pedraza, R. Ferrer, V. Wille, “Optimisation of signal-level thresholds in mobile networks”, en *Proc. IEEE 55th Vehicular Technology Conference*, vol. 4, Birmingham (EEUU), May 2002, pp. 1655–1659.
- [VIII] M. Toril, S. Pedraza, R. Ferrer, V. Wille, “Optimization of handover margins in GSM/GPRS networks”, en *Proc. IEEE 57th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, Jeju (Korea), May 2003, pp. 150–154.
- [IX] I. Jiménez, M. Toril, R. Toril, O. Fernández, “Análisis del rendimiento de un sistema GSM con distribución no homogénea de tráfico,” en *Actas del XIX Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de la Radio (URSI)*, Barcelona (España), Sep 2004.
- [X] M. Toril, V. Wille, I. Molina, “Mejora de la consistencia espacial de la asignación de celdas a unidades de control de paquetes en GERAN”, en *Actas del XXII Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de la Radio (URSI)*, Tenerife (España), Sep 2007.
- [XI] M. Toril, V. Wille, “Optimisation of the structure of cellular network by graph partitioning techniques”, en *COST293 action, Discussion Workshop*, Roma (Italia), Oct 2008.

*e) Peticiones de patente*

- [XII] S. Pedraza and M. Toril, “Method and system for load sharing between a plurality of cells in a radio network system”, Patent application WO 02/104058 A1, Dic 2002.
- [XIII] S. Pedraza and M. Toril, “Method for setting parameters of a cellular radio network, in particular for access and handover”, Patent application WO 03/037017 A1, May 2003.
- [XIV] S. Pedraza and M. Toril, “Method and system for harmonizing an operation area for a mobile device in a cellular radio”, Patent application WO 03/037020 A1, May 2003.

[I, III, V-IX, XII-XIV] tratan sobre la optimización de parámetros de traspaso en GERAN, mientras que [II, X, XI] se dedican a la optimización de la asignación de PCUs en GERAN. [I, II, VIII] presentan los resultados de las pruebas de campo iniciales que demuestran el potencial de las técnicas propuestas. [V, VI, XII-XIV] describen algoritmos de ajuste de parámetros más sofisticados y [III, VII, X, XI] presentan los resultados de estos métodos sobre modelos basados en medidas o modelos de simulación.

El autor de esta memoria es el principal autor de [II, III, IV, VII, VIII, X, XI], además de contribuir activamente en el resto de artículos. En [I], el autor estuvo involucrado en las fases de diseño, análisis de resultados y escritura, mientras que desarrolló parcialmente la herramienta de simulación empleada en esta tesis, descrita en [IX]. En [V, VI], del cual se han vendido más de 6000 copias entre diversas ediciones, el autor escribió la sección dedicada a la optimización de parámetros. Finalmente, el autor comparte la autoría de las peticiones de patente internacional [XII, XIII, XIV], cuyos derechos pertenecen a Nokia Corporation. Las tres se han concedido ya en diversos países, entre los que se encuentra Estados Unidos.

[I, V-VIII, XII-XIV] se desarrollaron en el *Centro de Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones Móviles* (2000-2003) de Nokia Spain en Málaga. [III, IX] se desarrollaron en el proyecto TIC2003-07827 (2003-2005) del Ministerio de Ciencia y Tecnología. Finalmente, [II, X, XI] son fruto de la colaboración con Nokia Networks en el Reino Unido.

Esta tesis obtuvo la calificación de "Sobresaliente Cum Laude" con mención de "Doctorado Europeo" en la Universidad de Málaga. Para ello, el autor cumplió un periodo de tres meses en el *School of Computing and Mathematical Sciences* de la Universidad de Greenwich (Londres, Reino Unido) como investigador visitante en 2006. El trabajo en Greenwich estuvo supervisado por el Dr. Chris Walshaw, desarrollador del conocido paquete de partición de grafos JOSTLE. Asimismo, esta tesis obtuvo informes favorables de los Drs. Sean McGrath (Universidad de Limerick) y Jeroen Wigard (Nokia Siemens Networks), investigadores de reconocido prestigio en optimización de redes de comunicaciones móviles.

## Aplicabilidad práctica e interés industrial

En los últimos años se ha detectado un cambio de prioridades en los operadores de redes de telefonía móvil. Tras el fuerte desembolso realizado para el despliegue de UMTS y el aumento de competitividad en el sector, los operadores se han visto forzados a reducir la inversión en equipamiento y los costes de operación al máximo. De esta manera, gran parte de sus esfuerzos se destinan ahora a mejorar la eficiencia de operación, y no tanto a incrementar el rendimiento de la red.

La idea central de esta tesis surgió en el contrato "*Centro de Competencia de Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones Móviles*" (2000-2003), entre Nokia España y la Universidad de Málaga, desarrollado en el centro de investigación que la Universidad de Málaga posee en el Parque Tecnológico de Andalucía (P.T.A.). Durante este contrato, el autor participó en el proyecto "*GERAN Automation*", dirigido por el Dr. Volker Wille (perteneciente a Nokia Networks y co-director de esta tesis). En este proyecto se trataba de desarrollar una aplicación de gestión automática de redes GERAN, que liberara al operador de tareas rutinarias, tales como la recolección de estadísticas, el análisis de datos y la implementación de los cambios. Con esta aplicación, los operadores pueden desarrollar algoritmos sofisticados que combinen datos de diversas fuentes, repitiéndose, sin esfuerzo, en el espacio y en el tiempo. Con ello, se pretendía mejorar el rendimiento de las redes actuales e incrementar su eficiencia operacional. Esta tesis se inició para dotar de contenido a esta aplicación mediante el diseño de nuevos algoritmos de optimización de red.

Con esta orientación eminentemente práctica, se decidió que tanto la selección del problema como la formulación del mismo en términos cualitativos la realizara directamente el operador. El acceso directo a la información del fabricante (en este caso, Nokia) permitió tener en cuenta, con todo lujo de detalles, las limitaciones impuestas por el equipamiento. Al mismo tiempo, se

fijó como condicionante de partida que los métodos de solución propuestos fueran directamente aplicables, sin requerir cambio alguno en el equipamiento de red. De esta manera, los métodos de optimización debían utilizar parámetros de red e indicadores de funcionamiento existentes en los equipos actuales. Asimismo, los métodos debían ejecutarse de manera independiente de la red, interaccionando con la red únicamente por medio de archivos de estadísticas y configuración de parámetros. De igual forma, los indicadores de mérito empleados para la validación de los métodos debían incluir aspectos operativos que habitualmente se han dejado de lado por la comunidad investigadora. Entre otros indicadores se pueden citar la robustez, el tiempo de ejecución, el coste de implementar los cambios en la red y la facilidad de comprobar la nueva solución.

La consideración de todos estos aspectos prácticos ha supuesto un esfuerzo adicional, tanto en el modelado del problema, como en el desarrollo y validación de los métodos de solución. Sin embargo, esto ha permitido la realización de pruebas de campo en redes reales, que, de otro modo, no habrían recibido el visto bueno del operador. Es fácil entender que los operadores son bastantes reacios a modificar parámetros que tienen un gran impacto en el rendimiento de la red. Únicamente si el método empleado es seguro e intuitivo y se demuestra que el beneficio potencial es grande, los operadores autorizan estas pruebas. Los resultados de las dos pruebas de campo descritas en esta tesis ponen de manifiesto la necesidad de mejorar los procedimientos de replanificación actuales y la mejora de rendimiento y eficiencia operacional posible en un caso real. La valoración positiva por parte de un operador del prestigio de Orange UK, con más de 15 millones de clientes en el Reino Unido, confirma el interés de las técnicas diseñadas.

En aquellos casos en los que no ha sido posible la validación de los métodos en una red real, la disposición de medidas de redes reales, suministradas por Nokia, ha permitido construir modelos analíticos y de simulación que reflejan la realidad. El análisis de estos datos reales ya supone de por sí un valor añadido a esta tesis. Los resultados del análisis han permitido, y permitirán en el futuro, adaptar métodos de otras disciplinas al entorno celular.

Los buenos resultados obtenidos no dejan lugar a dudas del beneficio técnico, económico y social de las técnicas propuestas. Desde el punto de vista del operador, estas técnicas mejoran significativamente la capacidad de las redes GERAN actuales. Esto se traduce en un aumento de las llamadas realizadas con éxito, cifrado en un 3.3% según la prueba de campo, y un aumento del número de usuarios permitido, cifrado en un 15% según las simulaciones. Es importante destacar que los métodos propuestos no requieren cambio alguno en los equipos de red actuales. Al contrario, estos métodos retrasan (o incluso evitan) la necesidad de ampliar los recursos de red en el futuro. Al mismo tiempo, con estos métodos se automatizan tareas que hasta la fecha se han venido realizando manualmente, reduciendo así la carga de trabajo, el retardo de respuesta y la probabilidad de error. Esta reducción de costes de equipamiento y operación mejora el margen de beneficios del operador, lo que permitiría una reducción del coste del servicio para el usuario, crucial en un entorno tan competitivo como el de la telefonía móvil. Por el lado del usuario, se reduce la probabilidad de bloqueo y caída de las llamadas de voz (según la prueba de campo, en un 55 y un 31%, respectivamente), y se reduce el retardo máximo en las llamadas de datos (según la prueba, un 33%). Todo esto se traduce en una mejor calidad de servicio.

El hecho de que Nokia haya subvencionado los gastos del proceso de solicitud de patente, y sea propietaria de sus derechos de explotación, es una garantía del interés industrial del trabajo. En este sentido, hay que destacar que toda petición de patente en Nokia debe pasar por un proceso de evaluación interna, en el que se valoran especialmente la novedad, el esfuerzo de desarrollo requerido para su puesta en funcionamiento y las ventajas respecto al estado de la tecnología actual.

La mayoría de los métodos de optimización de parámetros concebidos en esta tesis se han incluido en aplicaciones de gestión automática de redes 2G/2.5G desarrolladas por Nokia. Además, las técnicas de asignación de PCUs propuestas se utilizan hoy en día por Nokia Siemens Networks para sus servicios de optimización de red en toda Europa. En la actualidad se trabaja con el Dr. Wille para adaptar las técnicas de partición de grafos desarrolladas en esta tesis a la planificación de controladores de estación base y áreas de localización en redes de varias tecnologías.

## Referencias bibliográficas

- [1] V. Rexhepi, M. Moissio, S. Hamiti, and R. Vaittinen, “Performance of streaming services in GERAN A/Gb mode,” in *Proc. IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, vol. 6, Sep 2004, pp. 4511–4515.
- [2] M. Toril, V. Wille, and R. Barco, “Optimization of the assignment of cells to packet control units in GERAN,” *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 3, pp. 219 – 221, Mar 2006.
- [3] K. Schloegel, G. Karypis, and V. Kumar, “Graph partitioning for high performance scientific simulations,” in *CRPC Parallel Computing Handbook*, J. Dongarra, I. Foster, G. Fox, K. Kennedy, and A. White, Eds. Morgan Kaufmann, 2000.
- [4] S.S.Rao, *Engineering optimization: Theory and Practice, 3<sup>rd</sup> edition*. John Wiley & Sons, 1996.
- [5] G. Nemhauser and L. Wolsey, *Integer and Combinatorial Optimization*. John Wiley & Sons, 1999.
- [6] B. W. Kernighan and S. Lin, “An efficient heuristic procedure for partitioning graphs,” *Bell System Technical Journal*, vol. 49, pp. 291–307, 1970.
- [7] T. N. Bui and C. Jones, “A heuristic for reducing fill-in in sparse matrix factorization,” in *Proc. 6th SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing*, 1993, pp. 445–452.
- [8] G. Karypis and V. Kumar, “Multilevel k-way partitioning scheme for irregular graphs,” *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 48, no. 1, pp. 96–129, 1998.
- [9] K. D. Boese, A. Khang, and S. Muddu, “A new adaptive multi-start technique for combinatorial global optimizations,” *Operation Research Letters*, vol. 16, pp. 101–113, 1994.
- [10] L. Hagen and A. Kahng, “Combining problem reduction and adaptive multi-start: A new technique for superior iterative partitioning,” *IEEE Transactions On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 16, no. 7, pp. 709–717, 1997.
- [11] A. Merchant and B. Sengupta, “Assignment of cells to switches in PCS networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 3, no. 5, pp. 521–526, Oct 1995.
- [12] D. Saha, A. Mukherjee, and P. S. Bhattacharjee, “A simple heuristic for assignment of cells to switches in a PCS network,” *Wireless Personal Communications*, vol. 12, pp. 209–224, 2000.
- [13] S. Pierre and F. Houeto, “A tabu-search approach for assigning cells to switches in cellular mobile networks,” *Computer Communications*, vol. 25, no. 5, pp. 465–478, Mar 2002.
- [14] P. Gondim, “Genetic algorithms and location area partitioning problem in cellular networks,” in *Proc. 46th IEEE Vehicular Technology Conference*, May 1996, pp. 1835–1838.
- [15] J. Plehn, “The design of location areas in a GSM-network,” in *Proc. 45th IEEE Vehicular Technology Conference*, Jun 1995, pp. 871–875.
- [16] I. Demirkol, C. Ersoy, M. U. Caglayan, and H. Delic, “Location area planning and cell-to-switch assignment in cellular networks,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 3, pp. 880–890, May 2004.
- [17] P. S. Bhattacharjee, D. Saha, and A. Mukherjee, “An approach for location area planning in a personal communication services network (PCSN),” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 3, no. 4, pp. 1176–1187, Jul 2004.

- [18] 3GPP TS 06.02, *Half-rate speech; Half-rate speech processing functions; GSM-Phase2+, Release 99*, 3GPP Std., Rev. 8.0.0, Jul 2000.
- [19] B.Eklund, "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, Apr 1986.
- [20] J.Karlsson and B.Eklund, "A cellular mobile telephone system with load sharing - an enhancement of directed retry," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 37, no. 5, pp. 530–535, May 1989.
- [21] J. Kojima and 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.
- [22] D. Lee and C. Xu, "Mechanical antenna downtilt and its impact on system design," in *Proc. 47th IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2, May 1997, pp. 447–451.
- [23] C. Saraydar and 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] J.Wigard, T.T.Nielsen, P.H.Michaelsen, and P.Morgensen, "On a handover algorithm in a PCS1900/GSM/DCS1800 network," in *Proc. 49th IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 3, Jul 1999, pp. 2510–2514.
- [25] S.Kourtis and R.Tafazolli, "Adaptive handover boundaries: a proposed scheme for enhanced system performance," in *Proc. 51st IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 3, Jul 2000, pp. 2344–2349.
- [26] T.Chandra, W.Jeanes, and H.Leung, "Determination of optimal handover boundaries in a cellular network based on traffic distribution analysis of mobile measurement reports," in *Proc. 47th IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 1, May 1997, pp. 305–309.
- [27] J.Steuer and K.Jobmann, "The use of mobile positioning supported traffic density measurements to assist load balancing methods based on adaptive cell sizing," in *Proc. 13th IEEE Int. Symp. on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, Jul 2002, pp. 339–343.
- [28] T. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. McGraw-Hill, 1995.

## ANEXO: PUBLICACIONES

### A) Revistas

- A.1) V. Wille, S. Pedraza, M. Toril, R. Ferrer, J. Escobar, “Trial results from adaptive hand-over boundary modification in GERAN”, *Electronics Letters*, ISSN: 0013-5194, vol. 39, no. 4, pp. 405–407, Feb 2003.
- A.2) M. Toril, V. Wille, R. Barco, “Optimization of the assignment of cells to packet control units in GERAN”, *IEEE Communications Letters*, ISSN: 1089-7798, vol. 10, no. 3, pp. 219 – 221, Mar 2006.
- A.3) M. Toril, V. Wille, “Optimization of handover parameters for traffic sharing in GERAN”, *Wireless Personal Communications*, ISSN: 1022-0038, a publicar en 2008.

### B) Actas de congresos

- B.1) M. Toril, S. Pedraza, R. Ferrer, V. Wille, “Optimization of signal-level thresholds in mobile networks”, in *Proc. IEEE 55th Vehicular Technology Conference*, vol. 4, Birmingham (EEUU), May 2002, pp. 1655–1659.
- B.2) M. Toril, S. Pedraza, R. Ferrer, V. Wille, “Optimization of handover margins in GSM/GPRS networks”, in *Proc. IEEE 57th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, Jeju (Korea), May 2003, pp. 150–154.
- B.3) I. Jiménez, M. Toril, R. Toril, O. Fernández, “Análisis del rendimiento de un sistema GSM con distribución no homogénea de tráfico,” en *Actas del XIX Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de la Radio (URSI)*, Barcelona (España), Sep 2004.
- B.4) M. Toril, V. Wille, I. Molina, “Mejora de la consistencia espacial de la asignación de celdas a unidades de control de paquetes en GERAN”, en *Actas del XXII Simposio Nacional de la Unión Científica Internacional de la Radio (URSI)*, Tenerife (España), Sep 2007.