

Resumen de la Tesis Doctoral

Contribución al Diseño de Redes

Móviles de 3^a Generación con Tecnología WCDMA

Realizada por *José Antonio Portilla Figueras*.
en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones
de la Universidad de Cantabria.

Colegiado COIT número: 9150 Asociado COIT número: 10717.

Esta Tesis Doctoral fue dirigida por: *Dr. Klaus D. Hackbarth* Catedrático de Universidad por la Universidad de Cantabria.

y leída el 19 de Mayo de 2004 obteniendo la calificación de *Sobresaliente Cum Laude por Unanimidad*

Capítulo 1

Introducción

Las redes móviles han supuesto una revolución tanto en el plano tecnológico como en el sociológico. Tecnológicamente han supuesto la convergencia en el estado del arte entre varias áreas de conocimiento de las tecnologías de la información y comunicaciones, mientras que socialmente han impulsado de manera notable el desarrollo de la llamada *Sociedad de la Información*, mediante el acercamiento de la tecnología a prácticamente la totalidad de la población.

En Europa el catalizador de esta revolución fue el estándar denominado GSM, al que tradicionalmente se le asocia el concepto de telefonía móvil. El servicio básico de este sistema, y sobre el que se centraba la mayoría de los esfuerzos de planificación, es el servicio de voz, y para él se encontraba optimizado. Sin embargo, los servicios de datos no disponían de todas las facilidades que presentaba el servicio de voz, y aunque existieron tímidos intentos, por ejemplo los sistemas HSCSD o WAP, no fue hasta la aparición del sistema GPRS cuando los servicios de transmisión de datos empezaron a desempeñar un papel relevante.

Las previsiones tecno-económicas, basadas en muchas ocasiones en extrapolaciones de lo ocurrido en redes fijas, indican que el futuro de las telecomunicaciones se encuentra en la posibilidad de establecer servicios multimedia mediante los terminales móviles, lo que implica necesariamente la transmisión de datos a alta velocidad. Con este objetivo se ha desarrollado el estándar denominado UMTS, bajo el paraguas del IMT-2000. Sin embargo debido a decisiones estratégicas erróneas, el despliegue de red y la introducción de nuevos servicios están sufriendo continuos retrasos.

La Tesis Doctoral desarrollada contribuye al diseño y dimensionado estratégico¹ de acceso, UTRAN, de una red UMTS. El objetivo se ha centrado en esta parte de la red puesto que es en ella donde se incurren el mayor porcentaje de los costes totales de despliegue y operación. Esta Tesis Doctoral propone dos contribuciones diferentes, pero altamente interrelacionadas entre si, en el campo del diseño de la red de acceso.

¹El diseño de redes móviles puede ser dividido en tres estadios temporales: Dimensionado, planificación e implementación y finalmente optimización y operación. Estos estadios coinciden con las etapas clásicas de planificación de redes: Planificación estratégica, táctica y operativa. Esta tesis doctoral se centra en el primer estadio, es decir, el dimensionado de la red que se encarga de la configuración y dimensionado de la red así como del establecimiento de los requisitos estratégicos de cobertura y calidad para cada servicio

La primera contribución considera el estudio del diseño del radio celular en los sistemas WCDMA, que es la tecnología de acceso al medio en el sistema WCDMA. En la literatura consultada se trata el problema del diseño celular bajo una perspectiva mono-servicio y apoyando el peso principal en la cobertura y en las limitaciones por potencia, ya sea en rango o por el control de potencia. Por otra parte, existen pocos estudios relativos a la capacidad celular que traten de combinaciones de servicios en el dimensionado y éstos principalmente consideran la asignación previa de capacidades a cada servicio, no entrando en criterios de optimización. En esta línea se presenta en esta Tesis Doctoral un modelo matemático con su correspondiente algoritmo, denominado *algoritmo reducido*, que permite estimar de manera sub-óptima el radio celular para cualquier combinación de servicios con sus correspondientes parámetros como tráfico individual, densidad de usuarios y QoS. Este algoritmo aprovecha gran parte del conocimiento existente en redes fijas sobre el estudio de la capacidad en redes multiservicio, principalmente en ATM. Adicionalmente se expone una ampliación del algoritmo para considerar los casos donde disminuye su rendimiento. Finalmente se demuestra la validez de los algoritmos mediante su verificación por comparación con otros algoritmos y mediante simulación.

La segunda contribución se centra en el campo de la planificación estratégica de redes de 3G. En el desarrollo de diversos proyectos dentro del Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad de Cantabria, se ha detectado que existe una carencia de herramientas que realicen el diseño completo de la red de acceso con fines estratégicos, es decir, que dados una serie de parámetros generales, alejados de la complejidad y de la extensión de los parámetros de la planificación operativa, sea capaz de estimar el despliegue de la red de acceso. Por ello se ha desarrollado la herramienta DIDERO 3G que es capaz de estimar el número y localizaciones de los Nodos B en cada ciudad o municipio de una determinada región bajo estudio. Por otra parte y a partir de los valores de tráfico obtenidos en los despliegues es capaz de establecer la estructura de la UTRAN, calculando el número y posición de los multiplexores y controladores, y ofreciendo estadísticas de tráfico sobre ellos. Los algoritmos desarrollados han sido implementados en la herramienta con el objeto de estudiar de la influencia de un incorrecto diseño celular en la UTRAN con el correspondiente aumento de la inversión. Los resultados de estos estudios son presentados en la sección dedicado a esta herramienta.

Este documento ofrece un resumen de la Tesis Doctoral y se encuentra estructurado en las siguientes secciones:

1. El cálculo del radio celular y el problema de la distribución de carga.
2. Antecedente y justificación y relevancia de la Tesis Doctoral.
3. Algoritmo para el dimensionado celular.
4. Validación y resultados de los algoritmos.
5. DIDERO 3G Herramienta para el diseño de la red de acceso UTRAN, y aplicación de los algoritmos.
6. Conclusiones y publicaciones.

Capítulo 2

El cálculo del radio celular y el problema de la distribución de carga

El cálculo del radio celular en sistemas móviles celulares se sustenta principalmente en dos factores:

- Cálculo de la capacidad.
- Cálculo de la cobertura.

En los sistemas de 2G, como GSM, el factor principal es la cobertura, es decir la propagación radio. La capacidad de estos sistemas se encuentra principalmente limitada por el hardware de la BTS, concepto denominado *hard blocking capacity*. Si se precisa un aumento en la capacidad del sistema basta con aumentar la cantidad de hardware en la BTS ¹. El estudio de la capacidad en los sistemas celulares ha sido ampliamente tratado en la literatura.

En los sistemas de 3G, basados mayoritariamente en tecnologías de acceso al medio por división de código, existe una fuerte interrelación entre la capacidad y la cobertura. Esta situación se debe a que la capacidad de estos sistemas se encuentra limitada por interferencia, que a su vez limita la cobertura.

Adicionalmente, en los sistemas basados en CDMA existe una limitación de potencia adicional en la estación base (Nodo B), debido a que ésta se debe repartir entre todas las conexiones establecidas.

De lo anteriormente detallado se intuye que el cálculo del radio celular en los sistemas de 3G basados en FDD/FDMA/WCDMA es notablemente más complicado que en sistemas de 2G basados en FDD/FDMA/TDMA como GSM.

¹En la práctica, evidentemente, no es tan sencillo. La adición de un nuevo hardware en la estación base puede llegar a implicar, entre otros aspectos, la utilización de nuevos radiocanales con la obligatoria re-planificación de la asignación frecuencial a las células correspondientes

Por motivos de simplicidad este resumen introduce la problemática del cálculo del radio celular desde el punto de vista de la capacidad, puesto que los algoritmos desarrollados en la Tesis Doctoral se centran en este punto². La capacidad en sistemas WCDMA viene dictada por la *cantidad* de interferencia permitida en la célula, por lo tanto el estudio comienza por analizar las ecuaciones que dictan su comportamiento. El desarrollo se encuentra sensiblemente simplificado, exponiendo únicamente las expresiones de partida y finales, en las que se sustenta posteriormente el desarrollo de los algoritmos.

Enlace ascendente

Partimos de la ecuación básica de los requerimientos de calidad del servicio i para la conexión k ³ expresados por la ecuación 2.1:

$$\frac{W}{v_{i,k} \cdot R_{i,k}} \cdot \left(\frac{p_{i,k}}{I_{Total} - p_{i,k}} \right) \geq \left(\frac{Eb}{No} \right)_{i,k} \quad \begin{array}{l} k = 1 \dots K_i \\ i = 1 \dots S \end{array} \quad (2.1)$$

Donde

- K_i : Número total de conexiones del servicio i
- S : Número de servicios considerados en el escenario de trabajo.
- W : Tasa de chip, 3.84 Mchps.
- $v_{i,k}$: Factor de actividad de la conexión k del servicio i .
- $R_{i,k}$: Velocidad binaria de la conexión k del servicio i .
- $p_{i,k}$: Potencia de la señal de la conexión k del servicio i .
- I_{Total} : Interferencia total presente en el sistema.
- $(Eb/No)_{i,k}$: Requerimiento mínimo de energía de bit sobre ruido precisada en recepción para la conexión k del servicio i .

Desarrollando la ecuación 2.1 y colocándonos en el límite de los requerimientos de calidad de servicio obtenemos la siguiente expresión:

$$p_{i,k} = \frac{1}{1 + \frac{1}{v_{i,k} \cdot R_{i,k} \cdot \left(\frac{Eb}{No} \right)_{i,k}}} \cdot I_{Total} \quad \begin{array}{l} k = 1 \dots K_i \\ i = 1 \dots S \end{array} \quad (2.2)$$

²Las restricciones del rango celular debidas a la cobertura y a la limitación de potencia de la estación base vienen detalladas en documento completo

³ Inicialmente se considera cada conexión k de cada servicio i individualmente, aunque más adelante se asume que los parámetros de las conexiones $k = 1 \dots K_i$ son constantes para cada servicio i

De donde obtenemos la expresión del factor de carga correspondiente a la conexión k del servicio i .

$$p_{i,k} = L_{i,k} \cdot I_{Total}$$

$$L_{i,k} = \frac{1}{1 + \frac{1}{v_{i,k} \cdot R_{i,k} \cdot \left(\frac{Eb}{No}\right)_{i,k}}} \quad (2.3)$$

Sumando todas las conexiones $k = 1 \dots K$ de todos los servicios $i = 1 \dots S$ se obtiene el factor de carga total en el enlace ascendente.

$$L_{Ti} = \sum_{k=1}^K L_{i,k}$$

$$\eta_{UL} = \sum_{i=1}^S L_{Ti} \quad (2.4)$$

Finalmente, se debe considerar la interferencia procedente de las células vecinas I_{oth} . Idealmente se expresa en función del valor de la interferencia en la propia célula mediante el factor de interferencia intercelular en el enlace ascendente, f_{UL} según la siguiente expresión.

$$I_{oth} = f_{UL} \cdot I_{own} \quad (2.5)$$

Quedando por lo tanto la expresión de la carga total en el enlace ascendente de la siguiente manera:

$$\eta_{UL} = (1 + f_{UL}) \cdot \sum_{i=1}^S L_{Ti} \quad (2.6)$$

El valor de la interferencia intercelular expuesto en las ecuaciones anteriores incluye el efecto de la sectorización del Nodo B. La relación entre el factor de interferencia intercelular, con y sin sectorización, se muestra en la ecuación 2.7:

$$f_{UL_Sector} = f_{UL_OMNI} \cdot \frac{N_{Sectores}}{\zeta} \quad (2.7)$$

Donde $N_{sectores}$ es el número de sectores del Nodo B, y ζ la ganancia por sectorización.

El factor de elevación de fondo de ruido *Noise Floor Rise (NFR)*, expresa el exceso de interferencia en el sistema cuando está cargado, es decir, cuando hay conexiones de usuarios,

respecto a cuando está vacío.

$$NFR = \frac{I}{N} = \frac{1}{1 - \eta_{UL}} \quad (2.8)$$

Se puede observar claramente que el valor máximo de η_{UL} es la unidad. Cuando toma este valor, la ecuación 2.8 tiene un polo, y el sistema se vuelve inestable. Para evitar esta situación se fijan límites máximos entre el 50 % y el 75 % total de carga.

La elección del valor de este límite es crítica puesto que influye directamente en la capacidad y la cobertura. El NFR expresado en decibelios corresponde al valor del margen de interferencia MI que se aplica al realizar el balance de enlace (*RadioLinkBudget*). Por lo tanto un valor bajo, limitará la capacidad del sistema y un valor alto puede limitar la cobertura.

$$MI = 10 \cdot \text{Log}(NFR) \quad (2.9)$$

Enlace descendente

La estructura del cálculo del radio celular en el enlace descendente es similar al enlace ascendente. Sin embargo, existen ciertas consideraciones adicionales con respecto a la ortogonalidad entre los códigos de las conexiones y en los factores de interferencia intercelular que deben ser tenidos en cuenta.

La siguiente expresión relaciona el valor de la $(Eb/No)_i$ con la potencia de señal mínima transmitida por la estación base para cumplir estas exigencias de QoS.

$$\left(\frac{Eb}{N_0}\right)_{k,i} = \frac{P_{S_i|TX} \cdot \frac{W}{L_{m,k,i}}}{Vb_i \cdot \sigma_{k,i} \left((1 - \phi_{k,i}) \cdot \frac{P_{BNode}}{L_{m,k,i}} + P_{BNode} \cdot \sum_{m=1, m \neq n}^M \frac{1}{L_{n,k,i}} + P_N \right)} \quad (2.10)$$

Donde

- Vb_i : Velocidad binaria del servicio i .
- $m = 1 \dots M$: Células interferentes, con valor máximo M .
- n : Célula interferida.
- $k = 1 \dots K$: Conexión del servicio i , con valor máximo K .
- P_{BNode} : Potencia de transmisión del Nodo B.

- $P_{S_i|Tx}$: Potencia de transmisión asignada al servicio i .
- $L_{m,k,i}$: Atenuación en la trayectoria de la potencia de transmisión de la estación base de la célula m hacia el terminal con la conexión k del servicio i .
- $\phi_{k,i}$: Factor de ortogonalidad de la conexión k del servicio i .

En esta ecuación se observa que la potencia de transmisión se considera idéntica para todas las estaciones base. Esta situación no es cierta en la práctica, puesto que depende de la densidad de usuarios así como de las características del terreno para la propagación radioeléctrica. Sin embargo a la hora de plantear el modelo asumimos como aproximación que éstas sean iguales. Realizando un proceso similar al desarrollado en el enlace ascendente obtenemos factor de carga global en el enlace descendente η_{DL} , como:

$$\eta_{DL} = \sum_{i=1}^S \sum_{k=1}^K \left(\frac{Eb}{N_0} \right)_{k,i} \cdot \frac{Vbi \cdot \sigma_{k,i}}{W} \cdot ((1 - \phi_{k,i}) + f_{DL,k,i}) \quad (2.11)$$

$$f_{DL,k,i} = \sum_{m=1, m \neq n}^M \frac{L_{n,k,i}}{L_{m,k,i}}$$

Siendo $f_{DL,k,i}$ el factor de interferencia intercelular en el enlace descendente para la conexión k del servicio i .

Obteniendo el valor del factor de carga descendente para una única conexión:

$$L_{k,i} = \frac{\left(\frac{Eb}{N_0} \right)_i \cdot \sigma_{k,i}}{W/Vbi} \cdot [(1 - \phi_{k,i}) + f_{DL,k,i}] \quad (2.12)$$

El factor $\phi_{k,i}$ representa el factor de ortogonalidad en el enlace descendente. WCDMA emplea códigos ortogonales para separar las comunicaciones entre los diversos usuarios. El estudio del factor de ortogonalidad para cada una de las células es ciertamente complicado, pues depende de la posición del móvil en particular, del tipo de terreno donde se sitúe la célula y de lo cargada que se encuentre.

En la ecuación 2.12, el factor $f_{DL,k,i}$ representa el factor de interferencia intercelular de la conexión k del servicio i . Al contrario que en enlace ascendente, este factor es distinto para cada conexión debido a las distintas posiciones de los diversos terminales móviles en la célula. Desde el punto de vista de la planificación celular se consideran los valores medios $\bar{\phi}$ y \bar{f}_{DL} , tanto del factor de ortogonalidad $\phi_{k,i}$ como del $f_{DL,k,i}$.

En ambos casos, ascendente y descendente, el factor de interferencia intercelular es un parámetro de gran influencia en el diseño, además de depender de múltiples variables, como la distribución de tráfico, la sectorización, la potencia de los Nodos B etc.

Una vez conocidas las ecuaciones de carga nos disponemos a determinar los procedimientos para el cálculo del radio celular bajo condiciones de cobertura (*propagación radio*) y capacidad (*tráfico*).

2.0.1. Las restricciones por capacidad

Se dispone de un conjunto de servicios $S_i = \{1...S\}$ definido mediante los siguientes parámetros

- Régimen binario R_i
- Factor de actividad v_i
- UL Eb/No_i
- DL Eb/No_i
- Factor de Ortogonalidad medio $\bar{\phi}_i$
- Número de llamadas / conexiones en la Hora cargada por usuario α_i
- Duración de la llamada/ conexión ts_i
- Probabilidad de bloqueo objetivo pb_i
- Densidad de usuarios en la célula. ρ_i

Aunque en la fase operativa de WCDMA no existe, al menos a priori, segregación de capacidades, en la fase de dimensionado, a fin de calcular el radio celular, se divide el total de la capacidad entre los diversos servicios. Sin embargo, contrariamente a las redes fijas y móviles anteriores, la capacidad entendida como throughput en Kbps, depende en gran medida del servicio dominante, así como de la carga de las células vecinas, con lo cual es difícil realizar ese reparto. Sin embargo, lo que es invariable es la carga total de la célula, fijada usualmente entre el 50-75 %, por lo tanto podemos realizar un reparto de la carga total, en factores de carga totales para cada servicio, tal como se muestra en las ecuaciones 2.13, 2.14.

$$\underline{L_{T_UL}} = \{L_{T_UL1}, L_{T_UL2} \dots L_{T_ULS}\} \quad (2.13)$$

$$\underline{L_{T_DL}} = \{L_{T_DL1}, L_{T_DL2} \dots L_{T_DLS}\} \quad (2.14)$$

Cumpliendo siempre la siguiente condición:

$$1 > \eta_{UL} = \sum_{i=1}^S L_{TUL.i} \quad (2.15)$$

$$1 > \eta_{DL} = \sum_{i=1}^S L_{TDL.i}$$

Dado este factor de carga total por servicio se puede calcular el número de conexiones activas del servicio en ambas direcciones.

$$\begin{aligned} Nac_{UL_i} &= \frac{L_{T_UL_i}}{L_{UL_i} \cdot (1+f_{UL})} \\ Nac_{DL_i} &= \frac{L_{T_DL_i}}{L_{DL_i}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Este número de conexiones debe ser incrementado para contemplar el efecto de soft capacity que aparece en el sistema WCDMA. Este efecto consiste en que si las células vecinas se encuentran poco cargadas, la interferencia intercelular provocada por éstas en la célula bajo estudio es menor, con lo cual el *pool* de canales en nuestra célula aumenta.

$$\begin{aligned} Nac_{UL_i}|_{sc} &= Nac_{UL_i} \cdot (1 + f_{UL}) \\ Nac_{DL_i}|_{sc} &= Nac_{DL_i} \cdot (1 + \overline{f_{DL}}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Mediante este número de canales activos, utilizando la inversión de la fórmula de Erlang B, $B(N, A)$ ⁴, conocida la probabilidad de bloqueo del servicio Pb_i , se puede hallar la demanda de tráfico total ofrecido a la célula para este servicio $A_i|_{sc}$.

$$\begin{aligned} Pb_i &= B(A_{UL_i}|_{sc}, Nac_{UL_i}|_{sc}) \\ Pb_i &= B(A_{DL_i}|_{sc}, Nac_{DL_i}|_{sc}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Siendo Pb_i la probabilidad de bloqueo del servicio i , $Pb = (Pb_i; i = 1 \dots S)$. Esta capacidad expresada en Erlang debe ser reducida de manera correspondiente para considerar el caso de células igualmente cargadas, A_i , en lugar de con el efecto de *soft capacity*. Con esta operación garantizamos la calidad de servicio mediante un sobre-dimensionamiento.

$$\begin{aligned} A_{UL_i} &= \frac{A_{UL_i}|_{sc}}{(1+f_{UL})} \\ A_{DL_i} &= \frac{A_{DL_i}|_{sc}}{(1+\overline{f_{DL}})} \end{aligned} \quad (2.19)$$

⁴Observar que

$$Nac_{UL_i}|_{sc}$$

y

$$Nac_{DL_i}|_{sc}$$

tienen valores reales por lo cual se debe aplicar la inversión de la fórmula de Erlang generalizada para número reales.

Conocidas las tasas de llamada y la duración media de las conexiones del servicio i podemos averiguar el tráfico individual en este servicio:

$$a_i = \frac{\alpha_i \cdot ts_i}{3600} \quad (2.20)$$

Siendo a_i la tasa de llamadas en la hora cargada y ts_i la duración media de la llamada ⁵, $\underline{\alpha} = \{\alpha_i; i = 1 \dots S\}$ y $\underline{ts} = \{ts_i; i = 1 \dots S\}$.

El número de usuarios M_i se obtiene mediante la división del tráfico total ofrecido por servicio i y el tráfico individual. Obsérvese que M_{ULi} y M_{DLi} son valores reales.

$$M_{ULi} = \frac{A_{ULi}}{a_i} \quad (2.21)$$

$$M_{DLi} = \frac{A_{DLi}}{a_i}$$

El radio celular bajo criterio de carga de tráfico se obtiene mediante la relación entre la densidad de usuarios, el área celular y el número de usuarios de la ecuación anterior.

$$R_{TULi} = \sqrt{\frac{N_{Sectores} \cdot M_{ULi}}{\rho_i \cdot \pi}} \quad (2.22)$$

$$R_{TDLi} = \sqrt{\frac{N_{Sectores} \cdot M_{DLi}}{\rho_i \cdot \pi}}$$

Al realizar este cálculo para todos los servicios obtenemos un vector de radios para el enlace ascendente y otro para el descendente:

$$R_{TUL} = \{R_{TULi}; i = 1 \dots S\} \quad (2.23)$$

$$R_{TDL} = \{R_{TDLi}; i = 1 \dots S\}$$

2.1. El Problema de la Distribución de Carga

Tal y como se ha mostrado en el cálculo del radio según el tráfico, este valor depende principalmente del factor de carga que se le asigne a cada servicio. En células urbanas fuertemente cargadas, es muy posible que el radio limitante sea el obtenido mediante la capacidad celular. Por ello es ciertamente importante realizar adecuadamente la asignación de factores de carga a los diferentes servicios. Una asignación incorrecta provoca que los valores de radio celular obtenidos por cada servicio sean muy diferentes, es decir, los servicios no estén balanceados, por lo que al escoger el más restrictivo de todos ellos, se estaría infradimensionando la célula.

La asignación de los factores de carga iniciales para realizar la planificación puede realizarse de diferentes maneras. La más común es la propia asignación por parte del planificador de red de estos umbrales basándose en estudios estadísticos de tráfico y de la penetración de

⁵En este documento se utilizan indistintamente las palabras tasa de llamada y conexión.

mercado⁶. Sin embargo esta asignación puede incurrir en los desequilibrios comentados anteriormente.

Existe otra opción que consiste en realizar el estudio, asignando toda la capacidad a cada servicio individualmente, y escoger de nuevo el servicio más restrictivo. Pero con esta hipótesis no tenemos la certeza de cumplir la QoS de los servicios en el modo de operación.

La importancia de un correcto cálculo del radio celular se aprecia claramente cuando consideramos el nivel de dimensionamiento en el despliegue celular en un área determinada. La infravaloración del radio celular conlleva que se estimen un mayor número de Nodos B para cubrir la región, con el consiguiente aumento de la estimación de la inversión necesaria, falseando las costes y por ende las tarifas de los servicios. En el otro extremo si se sobreesestima el valor del radio celular, se determinará un número menor de Nodos B para realizar el despliegue, lo que provoca que en la fase operativa se deban retomar todos los cálculos de despliegue, aparte de una determinación fallida de los parámetros tecno-económicos.

Por lo tanto, debemos concluir que es fundamental una correcta estimación del radio celular en la fase de dimensionado de la red. En esta Tesis Doctoral se mostrará el desarrollo matemático, la implementación y el proceso de verificación de un modelo para el cálculo óptimo del radio celular en sistemas WCDMA, aparte de su aplicación a una herramienta de planificación estratégica de redes móviles de 3^a Generación.

⁶Conversaciones con D. J. M. Jiménez de Telefónica I+D durante el 1st European Telecommunication School

Capítulo 3

Antecedentes

En el capítulo 1 se ha expuesto que la planificación de redes móviles puede subdivirse en tres estadios temporales.

- Diseño y Dimensionado estratégico de la red.
- Planificación Detallada e Implementación.
- Optimización y Operación de Red.

La Tesis Doctoral expone los diversos estudios y trabajos que han motivado el presente trabajo encuadrándolos en cada una de las pertinentes fases del proceso de planificación. Sin embargo en este resumen nos centraremos en las contribuciones más relevantes en la planificación estratégica y más concretamente en las que estudian la capacidad del sistema WCDMA. Previamente es necesario especificar claramente las funciones de la planificación estratégica:

- Selección de la tecnología.
- Requerimientos y estrategias para la cobertura y para cada servicio implementado.
- Configuración de red y dimensionamiento.
- Evaluación de inversión.

La selección de la tecnología a implementar es obviamente una decisión crítica. Esta decisión no sólo tiene un ámbito tecnológico sino también un marco temporal, es decir, una vez seleccionada una nueva tecnología se tiene que determinar cuándo se va a realizar la migración y en qué forma. A modo de ejemplo de estudios sobre la tecnología podemos citar la comparación entre cdma2000 y WCDMA presentada en por B. Sharan de Consulting Services, o el análisis de las tecnologías GPRS y UMTS y su evolución futura realizado por Christian De Lange y Giancarlo Arangath, director de marketing y manager tecnológico de Motorola respectivamente.

El trabajo más clásico en el estudio de la capacidad de los sistemas CDMA es el presentado por A. Viterbi en *On the Capacity of a Cellular CDMA System*. En este estudio se exponen los principios básicos de la modulación en espectro ensanchado en secuencia directa.

El estudio de la capacidad se ha centrado en muchos casos en el enlace descendente. Esto es debido a que mientras el enlace ascendente se encuentra limitado por la cobertura, debido a las restricciones de potencia de transmisión del terminal móvil, el enlace descendente puede encontrarse limitado por capacidad, debido al reparto de potencia entre todos los usuarios. En los estudios realizados por K. Sipila y S. Burley se estudian en detalle las ecuaciones de carga en el enlace descendente¹. En estos estudios, considerando ya el sistema WCDMA empiezan a aparecer la división en categorías de usuarios dependiendo de los servicios.

C. Cordier estudia el problema de la capacidad celular en el enlace descendente en entornos multiservicio. Para ello, se parte de la ecuación que relaciona el parámetro C/I , *Cell to Interference Ratio*, medido en la recepción por el terminal móvil con la potencia total transmitida por la estación base. Se deduce entonces una expresión para la capacidad total en Kbps, considerando el número máximo posible de usuarios de cada servicio en diferentes mezclas pre-establecidas de servicios.

Ampliando el entorno y considerando no ya una única célula o estación base sino el dimensionado de una determinada área, encontramos pocas referencias sobre modelos teóricos. No obstante debemos resaltar la contribución de S. Hurley, que expone un método para la planificación de la red de estaciones base en una determinada área.

En la misma línea encontramos los estudios realizados por Telefónica I+D conjuntamente con Telefónica de España. En ellos se expone la estructura e implementación de una herramienta para la planificación UMTS denominada URANO, *UMTS Radio Access Network Optimización*. El objetivo de esta herramienta es servir de ayuda a la planificación, mediante la optimización de localizaciones de estaciones base, y además servir de herramienta de análisis para una red ya implementada.

Como se puede observar, a lo largo de esta sección se ha hecho un análisis detallado del estado del arte de los estudios referidos al sistema UMTS y más concretamente a la UTRAN y al interfaz aire basado en WCDMA. Se ha dado una visión global, considerando todas las fases de la planificación, desde la optimización de algoritmos de gestión de recursos radio, hasta la planificación estratégica sobre áreas extensas, sin olvidar aspectos tácticos como los estudios de cobertura con métodos de trazado de rayos.

3.1. Objetivo y Alcance de la Tesis

Un objetivo relevante del dimensionado en la red de acceso UMTS consiste en la obtención de valores estimados sobre el número de Nodos B, una primera aproximación de sus localizaciones y los valores de tráfico por cada servicio. En base a estos datos se puede realizar una estimación de los costes de inversión que proporciona a un operador de red móvil los datos necesarios para realizar estudios de mercado. Estos estudios proporcionan resultados estratégicos fundamentales como la penetración de mercado necesaria para que la facturación por la prestación de los servicios produzca el retorno de inversión necesario (*R.O.I.*) para que el negocio móvil sea rentable.

¹En la literatura las ecuaciones de carga se denominan *Pole Equation*. Esto se debe a que en el denominador de las ecuaciones presenta la siguiente estructura $D(x) = 1 - f(x)$ donde x depende de la velocidad binaria del servicio considerado, del factor de actividad, del parámetro E_b/N_0 , y en el enlace descendente del factor de interferencia intercelular y del factor de ortogonalidad. Es obvio que esta ecuación presenta un polo con $X=1$.

La maximización del ingreso por tarificación de los servicios proviene de la maximización del número de usuarios por célula y por ende de la optimización del radio celular. El problema se desplaza ahora a la maximización del radio celular manteniendo los requisitos mínimos de GoS y QoS.

Como ya se ha mencionado, en el campo de las comunicaciones móviles siempre se le ha otorgado mayor importancia a los aspectos concernientes a la propagación radio en el cálculo del radio celular. En los sistemas basados en WCDMA esta tendencia ha cambiado debido a la importancia de los estudios sobre la capacidad de estos sistemas y su influencia en el propio dimensionado de la red, sobre todo en las áreas urbanas.

Sin embargo del estudio de documentación desarrollado en la Tesis Doctoral se deduce que aunque se esté trabajando en modelos de fuentes para los diversos servicios, [?], existen pocos estudios con referencia al pleno aprovechamiento de la capacidad en el interfaz aire.

Por ello una de las líneas de trabajo en la presente tesis trata de deducir un algoritmo para el dimensionado óptimo de una célula en entornos multiservicio, basados en el sistema WCDMA. Este método estará basado en la extensión de los modelos de tráfico multiservicio aplicados en redes fijas. Concretamente el modelo y el correspondiente algoritmo se basa en los estudios realizados por K. Lindberger y expuestos originalmente en [?].

En el campo de las herramientas software de planificación, tales como URANO o NET-DES, se ha observado que todas ellas realizan el proceso de diseño de la red sobre una única área concreta, típicamente una ciudad o parte de ella. Este tipo de estudio es insuficiente cuando en la fase de dimensionamiento se trata de obtener una estimación de la inversión en infraestructura de red, puesto que se precisa realizar la planificación de múltiples localizaciones, por ejemplo, en el caso de España las ciudades más importantes de una Comunidad Autónoma. En estos casos la precisión en la información que requieren las herramientas de planificación mencionadas, principalmente en los campos geográfico, topográfico y demográfico es inviable de obtener y tratar para un conjunto amplio de ciudades. Por otra parte las herramientas estudiadas limitan su ámbito de aplicación a la red de estaciones base o Nodos B, sin considerar el resto de la estructura de la UTRAN, es decir, concentradores y controladores (RNC). El número y la localización de los emplazamientos de estos elementos es un importante aspecto a tener en cuenta en la fase de dimensionado.

Por las razones anteriormente expuestas, y con el objetivo de cubrir las carencias de este tipo de herramientas, en esta Tesis se presenta el diseño, implementación y pruebas de una herramienta software para la planificación del conjunto de la UTRAN en una región extensa, desde el conjunto de estaciones base hasta la red de concentradores. La herramienta software, llamada DIDERO 3G, permite obtener, mediante un conjunto restringido de datos de entrada, la configuración completa de la UTRAN, de manera que se puedan realizar estimaciones de la inversión necesaria.

Capítulo 4

Algoritmo para el dimensionado celular.

4.1. Introducción

Las expresiones para el cálculo del radio han introducidas en la sección 2, proporcionándonos la base para el estudio de modelos y algoritmos para la estimación del radio celular. En estos modelos se debe tener en cuenta el problema de la distribución de carga previamente descrito. En concreto la Tesis Doctoral presenta tres modelos con sus correspondientes algoritmos:

1. Cálculo simple o directo.
2. Optimización mediante un algoritmo iterativo.
3. Optimización mediante la reducción del conjunto de servicios a un único servicio.

El cálculo simple está basado en la determinación de la mezcla de tráfico por parte del operador ¹. Éste establece las proporciones de la capacidad asignada a cada servicio, que se traduce en los consiguientes factores de carga iniciales. Mediante estos valores y el margen de interferencia, se calcula un valor de radio celular, que puede ser o no óptimo. Este valor del radio celular es, por lo tanto, claramente dependiente de la proporción de la capacidad asignada a cada servicio.

En el caso de existir desequilibrios en el radio celular calculado en los diferentes servicios, se puede aplicar un algoritmo iterativo para optimizar la solución. El fundamento de este algoritmo consiste en repartir adecuadamente, mediante una determinada función de asignación, la capacidad sobrante entre todos los servicios, hasta obtener un error inferior a un determinado umbral.

El tercer modelo consiste en la reducción del problema multiservicio a un servicio único artificial y realizar el dimensionado celular con este servicio, salvaguardando siempre los requisitos individuales de calidad de servicio. Adicionalmente se puede aplicar sobre este método un algoritmo iterativo para optimizar la solución en los casos en que sea necesaria. En la Tesis

¹Acudir a los trabajos de C. Cordier y Burley

Doctoral se ha desarrollado e implementado un algoritmo de este último tipo que es el que se procede a desarrollar en esta sección²

4.2. Optimización mediante reducción a un servicio único.

El objeto de este método es la aplicación del modelo de múltiples servicios para redes RD-SI y ATM, desarrollado por K. Lindberger al cálculo de la capacidad de los sistemas WCDMA con sus correspondientes particularidades.

El modelo parte de K clases de servicio distintas y realiza la superposición de ellas mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} m &= \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{\mu_k} \cdot \frac{Vb_k}{Vb_{min}} \\ v &= \sum_{k=1}^K \frac{\lambda_k}{\mu_k} \cdot \frac{Vb_k^2}{(Vb_{min})^2} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Donde λ_k es la tasa de llegada de las llamadas de la clase k y $1/\mu_k$ es la duración media de las llamadas de la clase k . Si definimos Vb_{min} y Vb_{max} como los valores mínimo y máximo respectivamente que toma $Vb, \forall k \in K$, la probabilidad media de bloqueo B_{med} y la probabilidad máxima de bloqueo individual B_{max} se pueden estimar mediante la siguiente expresión.

$$B_{med} = B\left(\frac{C - b^* + b_{min}}{b^*}, \frac{m}{b^*}\right) \tag{4.2}$$

$$B_{max} = B_{med} \cdot \frac{b_{max}}{b^*} \cdot \left(\frac{C}{m}\right)^{(b_{max}-b^*)/2 \cdot b^*} \tag{4.3}$$

Donde b^* es la relación entre la varianza y el valor medio (v/m), C la capacidad total del sistema y $B()$ es la fórmula de Erlang-B. De la misma manera, mediante la inversión de la fórmula de Erlang podemos hallar el valor del tráfico total del servicio agregado, o de la capacidad total.

La aplicación de este modelo al campo del diseño de redes móviles basadas en WCDMA presenta el inconveniente de no conocer el valor total de la capacidad de la célula. Tradicionalmente la capacidad de los sistemas se expresa o bien en Erlangs, o bien en su valor en Kbps. Sin embargo en células WCDMA este valor depende, entre otros factores, del número y clase de servicio de los usuarios activos en la célula siendo, en consecuencia, un valor variable. Por lo tanto, es necesario realizar un proceso de adaptación del modelo a este tipo de redes móviles.

Disponemos de una serie de servicios en la célula $\underline{S} = \{S_i, i = 1...S\}$, cada uno de ellos con una serie de parámetros asociados que se describen a continuación:

- Relación Eb/No mínima requerida.

²El conjunto de los algoritmos con sus referencias bibliográficas se desarrollan en el documento completo

- Tasa binaria.
- Factor de actividad.
- Factor de ortogonalidad medio en el enlace descendente.
- Densidad de usuarios en la célula.
- Tasa de llamadas en la hora cargada por usuario.
- Tiempo medio de conexión en la hora cargada por usuario.
- Probabilidad de pérdida admitida.

El objetivo es reducir el conjunto de los $\underline{S} = \{S_i, i = 1 \dots S\}$ servicios a un único servicio equivalente. Esta reducción se realiza mediante la ponderación de los parámetros de los servicios iniciales mediante el tráfico ofrecido por cada uno de ellos en una determinada área celular.

El modelo supone densidades constantes $\underline{\rho} = \{\rho_i, i = 1 \dots S\}$ de los usuarios potenciales de los diversos servicios dentro de la célula bajo estudio.

El modelo parte de un radio celular inicial R_{cell} , típicamente 1000 metros³. De este valor de R_{cell} y mediante la densidad de usuarios podemos obtener el valor de los tráficos de los diferentes servicios.

$$M_i = \frac{R_{cell}^2 \cdot \pi}{N_{Sectores}} \cdot \rho_i$$

$$A_i = M_i \cdot \alpha_i \cdot ts_i$$
(4.4)

Disponemos por lo tanto de un vector de tráfico $\underline{A} = \{A_i; i = 1 \dots S\}$, mediante el cual calculamos los valores de los parámetros del servicio equivalente según las siguientes expresiones:

$$Vb_{equi} = \frac{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i^2}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \quad Pb_{equi} = \frac{\sum_{i=1}^S Pb_i \cdot A_i \cdot Vb_i}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i}$$
(4.5)

$$\alpha_{equi} = \frac{\sum_{i=1}^S \alpha_i \cdot A_i \cdot Vb_i}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \quad ts_{equi} = \frac{\sum_{i=1}^S ts_i \cdot A_i \cdot Vb_i}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i}$$
(4.6)

$$\rho_{equi} = \frac{\sum_{k=1}^K \rho_i \cdot A_i \cdot Vb_i}{\sum_{k=1}^K A_i \cdot Vb_i} \quad \sigma_{equi} = \frac{\sum_{i=1}^S \sigma_i \cdot A_i \cdot Vb_i}{\sum_{k=1}^K A_i \cdot Vb_i}$$
(4.7)

³ Este valor se usa como punto de partida para el cálculo de las contribuciones de los servicios por ser un punto de cálculo sencillo, otros valores de partida son también admisibles, siempre que se encuentren dentro del orden de magnitud del radio final.

$$v_{equi} = \frac{\sum_{i=1}^S v_i \cdot A_i \cdot Vb_i}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \quad (4.8)$$

$$\left(\frac{Eb}{No}\right)_{equi_UL} = \frac{\sum_{i=1}^S \left(\frac{Eb}{No}\right)_i \cdot A_i \cdot Vb_i}{\sum_{i=1}^S A_i \cdot Vb_i} \quad \left(\frac{Eb}{No}\right)_{equi_DL} = \frac{\sum_{k=1}^K \left(\frac{Eb}{No}\right)_k \cdot A_k \cdot Vb_k}{\sum_{k=1}^K A_k \cdot Vb_k} \quad (4.9)$$

Con el valor obtenido de las ecuaciones anteriores se obtiene el factor de carga individual para cada una de las conexiones virtuales del servicio equivalente.

$$L_{equi}|_{UL} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{\left(\frac{Eb}{No}\right)_{equi_UL} \cdot v_{equi}}{W}}} \quad (4.10)$$

$$L_{equi}|_{DL} = \frac{\left(\frac{Eb}{No}\right)_{equi_UL} \cdot v_{equi}}{W/Vb_{equi}} \cdot \left[(1 - \overline{\phi_{equi}}) + \overline{f_{DL,equi}} \right] \quad (4.11)$$

La ventaja de utilizar el servicio equivalente es que asignamos el valor máximo del factor de carga permitido por el operador para este servicio, evitando posibles sobrantes de capacidad. Para poder calcular el número máximo de conexiones activas del servicio equivalente, dividimos el factor de carga máximo permitido por el operador entre el factor de carga individual del servicio equivalente ⁴.

$$Nac_{UL,equi} = \frac{\eta_{UL}}{L_{UL,equi} \cdot (1 + f_{UL})} \quad (4.12)$$

$$Nac_{DL,equi} = \frac{\eta_{DL}}{L_{DL,equi}}$$

Este valor debe ser incrementado por el correspondiente factor de interferencia intercelular.

$$Nac_{UL,equi}|_{sc} = (1 + f_{UL}) \cdot Nac_{UL,equi}$$

$$Nac_{DL,equi}|_{sc} = (1 + \overline{f_{DL}}) \cdot Nac_{DL,equi} \quad (4.13)$$

Nuevamente utilizamos la inversión de la fórmula de Erlang, B^{-1} para calcular el tráfico en la situación de *soft capacity*.

$$Pb_{equi} = B \left(A_{UL,equi}|_{sc}, Nac_{UL,equi}|_{sc} \right)$$

$$Pb_{equi} = B \left(A_{DL,equi}|_{sc}, Nac_{DL,equi}|_{sc} \right) \quad (4.14)$$

⁴ Observar que los valores de $Nac_{UL,equi}|_{sc}$ y $Nac_{DL,equi}|_{sc}$ pueden ser de tipo real, \Re , por lo que es necesario aplicar en los cálculos la extensión de la fórmula de Erlang propuesta por Jagerman

Recuperando el valor en situación de células igualmente cargadas:

$$\begin{aligned}
A_{UL_equi} &= \frac{A_{UL_equi}|_{sc}}{(1+f_{UL})} \\
A_{DL_equi} &= \frac{A_{DL_equi}|_{sc}}{(1+f_{DL})}
\end{aligned}
\tag{4.15}$$

Podemos averiguar ahora el número de *usuarios virtuales* del servicio mediante la división entre el tráfico total y el individual.

$$\begin{aligned}
M_{UL_equi} &= \frac{A_{UL_equi}}{\alpha_{equi} \cdot t_{sequi}} \\
M_{DL_equi} &= \frac{A_{DL_equi}}{\alpha_{equi} \cdot t_{sequi}}
\end{aligned}
\tag{4.16}$$

Y el radio celular mediante el servicio equivalente:

$$\begin{aligned}
R_{UL_equi} &= \sqrt{\frac{N_{Sectores} \cdot M_{UL_equi}}{\rho_{equi} \cdot \pi}} \\
R_{DL_equi} &= \sqrt{\frac{N_{Sectores} \cdot M_{DL_equi}}{\rho_{equi} \cdot \pi}}
\end{aligned}
\tag{4.17}$$

Finalmente obtenemos dos radios celulares basados en la aproximación del servicio equivalente, uno para el enlace ascendente y otro para el descendente. Como el objetivo consiste en dimensionar con el mayor grado de QoS, se selecciona el menor de ellos.

Con este radio se obtienen los factores de carga de cada uno de los servicios de manera individual, mediante la inversión del procedimiento descrito en la sección 2.0.1 en las ecuaciones 2.13 a 2.23. De esta manera se obtiene un vector de factores de carga reducido.

$$\begin{aligned}
\underline{L_{TULequi}} &= \{L_{TULequi.i}; i = 1 \dots S\} \\
\underline{L_{TDLequi}} &= \{L_{TDLequi.i}; i = 1 \dots S\}
\end{aligned}
\tag{4.18}$$

Seguidamente se obtiene el nuevo vector de factores de carga reales mediante una interpolación lineal, considerando el total del factor de carga η .

$$\begin{aligned}
L_{TUL_AC.i} &= \frac{L_{TULequi.i} \cdot \eta}{\sum_{i=1}^S L_{TULequi.i}} \\
L_{TDL_AC.i} &= \frac{L_{TDLequi.i} \cdot \eta}{\sum_{i=1}^S L_{TDLequi.i}}
\end{aligned}
\tag{4.19}$$

Con estos nuevos valores se realiza un nuevo cálculo del radio celular según el método simple. Finalmente se debe realizar la comprobación de limitación de potencia, con los valores obtenidos del algoritmo.

Cuando el número de usuarios potenciales, es decir, el número de fuentes, es limitado y además este número se encuentra dentro del mismo orden de magnitud que los servidores, la fórmula de Erlang produce una sobreestimación de los recursos. De forma simplificada este suceso se explica debido a que en la formulación de Erlang, la tasa de llamadas totales permanece invariable, a pesar de que haya usuarios activos en el sistema, puesto que al suponer fuentes infinitas, la reducción en un número de usuarios activos no afecta al total. Claramente éste no es el caso en los sistemas celulares. En este sentido, una contribución adicional, pero altamente significativa de esta Tesis Doctoral, es la aplicación de modelos de tráfico basados en fuentes finitas, concretamente el modelo de Engset, al diseño de redes móviles.

El algoritmo reducido obtiene valores óptimo para el radio celular cuando los parámetros de los servicios difieren claramente. En el caso de servicios con diferentes velocidades de usuario, por ejemplo, el servicio de voz con usuarios estáticos, con usuarios moviéndose a 3 Km/h, y datos a 64 Kbps con usuarios estáticos y usuarios a 3 Km/h el *algoritmo reducido* obtiene soluciones sub-óptimas. Para paliar esta inconveniencia se ha desarrollado el algoritmo denominado *algoritmo combinado*. Este método consiste en la concatenación de los dos algoritmos, el reducido como punto de partida y el iterativo para forzar la solución cercana a la óptima. Con ello se logra por una parte eliminar el problema del cálculo óptimo, y por otra la reducción drástica del número de iteraciones del algoritmo iterativo.

La verificación del modelo reducido y la comparación con el rendimiento del resto de los algoritmos se expone en el capítulo 5. En el siguiente capítulo se expone el diseño e implementación de un simulador para la verificación de la validez del algoritmo.

Capítulo 5

Validación y resultados de los algoritmos

Los modelos y algoritmos descritos en el capítulo anterior han sido implementados en un programa software denominado WCDMA CRE (Estimador de Radio Celular en WCDMA), para poder realizar estudios intensivos sobre ellos. La configuración y el funcionamiento de esta herramienta software se describen en el *Apéndice C* del documento completo de la Tesis Doctoral .

Los algoritmos desarrollados se han sometido a un intensivo banco de pruebas con objeto de demostrar su validez. La Tesis Doctoral presenta un resumen de las mismas, clasificadas en las siguientes categorías

- Escenario de servicio único¹
- Escenario de dos servicios.
- Escenario de dos servicios con diferentes velocidades en el movimiento de los usuarios.
- Escenario de tres servicios.
- Escenario de cuatro servicios.

Para cada uno de los escenarios se estudia la influencia de la utilización de los métodos de Erlang y Engset en el rendimiento de los modelos, considerando tráfico balanceado y no balanceado.

Los algoritmos desarrollados han sido también validados mediante un entorno de simulación desarrollado en OMNET ++ y expuesto en el *Capítulo 5* del documento.

Con objeto de no extendernos excesivamente en el resumen, nos limitaremos a los resultados obtenidos para el escenario más complejo de los estudiados, el escenario de cuatro

¹ Estático en el sentido de que no se considera una diferenciación en el movimiento de los usuarios y que se asume que su velocidad es inapreciable

servicios tanto para tráfico balanceado y como para tráfico no balanceado^{2,3}.

Escenario de cuatro servicios

Consideramos un escenario con cuatros servicios, voz a 12.2 Kbps, y datos a 64, 144 y 384 Kbps. Los valores de las densidades de los usuarios por cada uno de los servicios se ha seleccionado de manera que en el caso de tráfico balanceado, no exista ningún servicio dominante, y en el caso de tráfico no balanceado el servicio de voz tenga produzca el 90 % del tráfico total. La validación de los algoritmos reducido y combinado se produce mediante comparación con un algoritmo de asignación directa de las capacidades y con un algoritmo iterativo. El valor de partida de la asignación de carga a los diferentes servicios para estos dos algoritmos se calcula en función del tráfico individual y la densidad de usuarios. Estos valores se muestran en las tablas 5.1 y 5.2 para tráfico balanceado y no balanceado respectivamente.

| Servicio | $\rho_k (U/Km^2)$ | L_k | L_k |
|----------------|-------------------|-------|-------|
| Voz 12.2 Kbps | 384 | 0,405 | 0,303 |
| Datos 64 Kbps | 192 | 0,270 | 0,203 |
| Datos 144 Kbps | 90 | 0,190 | 0,142 |
| Datos 384 Kbps | 46 | 0,135 | 0.101 |

Tabla 5.1: Valores de densidades y factores de carga iniciales para el ejemplo de cuatro servicios balanceado.

| Servicio | $\rho_k (U/Km^2)$ | % L_k | L_k |
|----------------|-------------------|---------|-------|
| Voz 12.2 Kbps | 1343 | 0.985 | 0.738 |
| Datos 64 Kbps | 106 | 0.011 | 0.008 |
| Datos 144 Kbps | 70 | 0.003 | 0.002 |
| Datos 384 Kbps | 35 | 0.001 | 0.001 |

Tabla 5.2: Valores de densidades y factores de carga iniciales para el ejemplo de cuatro servicios no balanceado.

Seguidamente se muestran los valores de los radios celulares calculados según los algoritmos desarrollados usando las fórmulas de tráfico de Erlang y Engset. Para los algoritmos iterativo y combinado se muestra también el número de iteraciones necesarias para obtener el valor óptimo.

Podemos observar que la diferencia entre los resultados obtenidos con las fórmulas de Erlang y de Engset son significativas, de un 20 % en el mejor de los casos, proporcionado por los algoritmos reducido y combinado. Esta circunstancia se debe a que con un radio celular tan reducido, el número de usuarios de los servicios de datos presentes en la célula, es decir, el

²El término balanceado es una españolización de la palabra inglesa *balanced*. Este concepto quiere decir que los servicios se encuentran equilibrados, encontrándose los valores de tráfico de los mismos dentro del mismo orden de magnitud, sin desproporciones entre ellos.

³El conjunto de parámetros de definición de los escenarios y de cada servicio se encuentra en el documento completo

| Servicio | Radio Celular (m) | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|--------|---------------------------|---------------------------|-------------|--------|---------------------------|---------------------------|
| | A. Simple | | A. Iterativo | | A. Reducido | | A. Combinado | |
| | Erlang | Engset | Erlang, Iters=7 | Engset, Iters=6 | Erlang | Engset | Erlang, Iters=2 | Engset, Iters=1 |
| Voz 12.2 Kbps | 706 | 710 | 158 | 194 | 166 | 189 | 162 | 190 |
| Datos 64 Kbps | 271 | 277 | 156 | 189 | 169 | 189 | 156 | 190 |
| Datos 144 Kbps | 172 | 149 | 155 | 190 | 160 | 188 | 159 | 188 |
| Datos 384 Kbps | 35 | 74 | 155 | 187 | 148 | 188 | 153 | 188 |
| Radio Celular Final | 35 | 74 | 155 | 187 | 148 | 188 | 153 | 188 |

Tabla 5.3: Resultados de los algoritmos para cuatro servicios con tráfico balanceado.

número de fuentes, es muy bajo, concretamente de 10 para el caso del servicio a 144 Kbps y de 5 para el de 384 Kbps, y el número de servidores, o de posibles usuarios activos en la célula es de 3 para el servicio de 144 Kbps y de 2 para el de 384 Kbps. Bajo estas condiciones el método de Engset obtiene mejores rendimientos que el de Erlang. En el caso de la utilización de la fórmula de Engset, el método reducido proporciona el mismo resultado que el combinado, por lo que este último sólo precisa una única iteración. El método simple proporciona resultados muy alejados del resultado óptimo, 52 % inferiores, con lo que se demuestra la necesidad de un algoritmo que calcule eficientemente los valores de los factores de carga.

Consideremos ahora los resultados obtenidos para tráfico no balanceado. Los resultados para el radio celular se muestran en la tabla 5.4.

| Servicio | Radio Celular (m) | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|--------|---------------------------|---------------------------|-------------|--------|---------------------------|---------------------------|
| | A. Simple | | A. Iterativo | | A. Reducido | | A. Combinado | |
| | Erlang | Engset | Erlang, Iters=7 | Engset, Iters=7 | Erlang | Engset | Erlang, Iters=3 | Engset, Iters=3 |
| Voz 12.2 Kbps | 653 | 654 | 437 | 476 | 437 | 466 | 437 | 476 |
| Datos 64 Kbps | 81 | 125 | 437 | 476 | 437 | 491 | 438 | 476 |
| Datos 144 Kbps | 86 | 248 | 445 | 482 | 430 | 569 | 445 | 482 |
| Datos 384 Kbps | 132 | 351 | 458 | 475 | 459 | 498 | 458 | 475 |
| Radio Celular Final | 81 | 125 | 437 | 475 | 430 | 466 | 437 | 475 |

Tabla 5.4: Resultados de los algoritmos cuatro servicios con tráfico no balanceado.

En este ejemplo se mantiene la disparidad de resultados entre el cálculo mediante el algoritmo simple y el valor óptimo con un error del 70 %. En este caso el algoritmo reducido no logra un ajuste tan exacto del valor óptimo, con un error del 1.8 %, pero sin embargo proporciona un punto de partida claramente favorable al algoritmo combinado para conseguir el radio celular óptimo con una mejora del 60 % sobre el iterativo. Las diferencias entre el uso del método de Engset y Erlang en el cálculo son cercanas al 10 % en todos los casos menos

en el algoritmo simple que se elevan hasta el 35 %.

Como conclusión de este apartado se debe resaltar que aunque la asignación a través de la densidad de usuarios ponderada por el tráfico puede parecer acertada a priori, se demuestra que proporciona un valor del radio celular muy alejado del valor óptimo. Es posible establecer fórmulas que obtengan valores más cercanos a los óptimos, considerando por ejemplo la velocidad binaria de cada servicio. Sin embargo, en cualquier caso, el planificador de red tendrá la certeza de que el radio celular es el óptimo a menos que realice un proceso iterativo sobre los resultados iniciales. En esta línea de actuación se ha demostrado que el algoritmo reducido proporciona valores iniciales cercanos a los óptimos, de lo que resulta que en el peor de los casos, se reduce el número de iteraciones para hallar el valor óptimo.

En las gráficas 5.1 5.2 para el caso balanceado y 5.3 5.4 para el caso no balanceado se muestran las relaciones entre los radios celulares absolutos en todos los escenarios simulados, y el número de iteraciones de los algoritmos iterativo y combinado con objeto de mostrar la mejora del rendimiento que producen tanto para el tráfico balanceado como no balanceado.

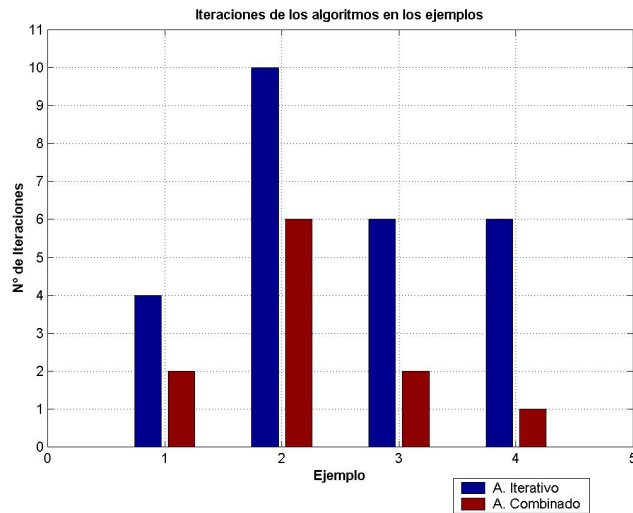


Figura 5.1: Relación entre el número de iteraciones de los algoritmos iterativo y combinado en los cuatro escenarios bajo estudio (Tráfico Balanceado).

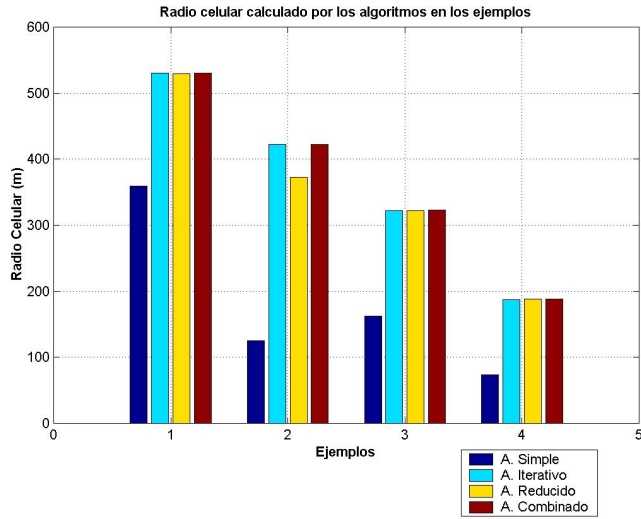


Figura 5.2: Representación de los radios celulares obtenidos en los diversos escenarios para los cuatro algoritmos (Tráfico Balanceado).

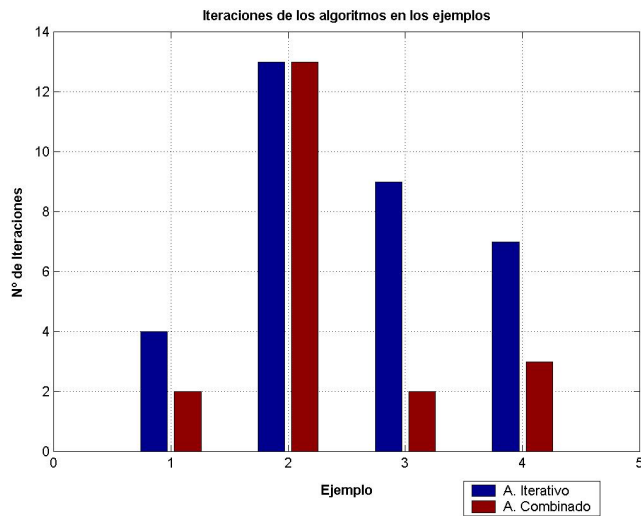


Figura 5.3: Relación entre el número de iteraciones de los algoritmos iterativo y combinado en los cuatro escenarios de servicios (Tráfico no Balanceado).

Como resumen debemos decir que considerando todos los ejemplos, balanceados y no balanceados, el error medio del algoritmo reducido es del 5.75 % sobre el valor óptimo en el cálculo del radio celular, mientras que la mejora del rendimiento en cuanto a número de iteraciones del algoritmo combinado sobre el iterativo es del 49 %. Los mayores errores que produce el algoritmo reducido ocurren en presencia de servicios definidos con varias velocidades. En caso

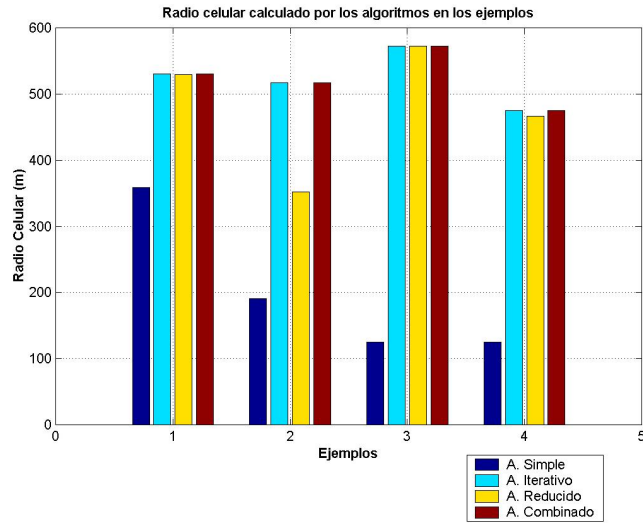


Figura 5.4: Radios celulares en los diversos escenarios para los cuatro algoritmos (Tráfico no Balanceado).

de no considerarlos en el escenario de trabajo, el algoritmo reducido es suficiente para estimar el valor óptimo del radio celular, con un error medio del 0.38 %.

5.1. Validación de los Resultados de los Algoritmos Mediante Simulación

El objetivo de esta sección es la verificación de los resultados numéricos de los algoritmos comparándolos con los resultados de las simulaciones para lo que se utilizará el simulador celular expuesto en el capítulo quinto de la memoria. Nos centraremos principalmente en el cumplimiento de los requisitos de GoS de los diversos servicios, reflejado en los valores máximos de la probabilidad de pérdida. Se ofrecen resultados sobre los mismos escenarios de ejemplo tanto para tráfico balanceado como para tráfico no balanceado.

Escenario de cuatro servicios con tráfico balanceado

Este escenario es el más completo al considerar los cuatro servicios, voz a 12.2 Kbps con P_l de 1 % y servicios de datos a 64, 144 y 384 Kbps, con P_l del 5%. El radio celular es de 188 metros en una célula omnidireccional, que implica un escenario muy cargado en lo que a tráfico se refiere. Los valores de la probabilidad de pérdida simulada se ofrecen en la tabla 5.5.

Observamos que se cumplen los requerimientos de GoS de todos los servicios por lo que hemos de validar el resultado del radio celular obtenido mediante el algoritmo reducido.

| Servicio | Llamadas Ofrecidas | Llamadas Cursadas | Llamadas Perdidas | Probabilidad de Pérdida |
|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Voz 12.2 Kbps | 22787.6 | 22748 | 39.6 | 0.0017 |
| Datos 64 Kbps | 10849 | 10781.8 | 67.2 | 0.0062 |
| Datos 144 Kbps | 5036.4 | 4956.4 | 79.6 | 0.0160 |
| Datos 384 Kbps | 2178.8 | 2065 | 113.8 | 0.0506 |

Tabla 5.5: Resultados de la simulación para cuatro servicios con tráfico balanceado.

Los resultados de las simulaciones muestran que los servicios de velocidades más bajas presentan probabilidades de pérdida simuladas menores que las calculadas mediante los algoritmos. Esta situación se debe a que en los algoritmos se proporciona una capacidad máxima a cada servicio, es decir, no se permite ocupar capacidades libres. Sin embargo, en el simulador no se realiza este tipo de segregación, permitiendo a los usuarios de los servicios acceder a toda la capacidad. Por ello el servicio más restrictivo es siempre el que precisa mayor capacidad. En este sentido los resultados de la simulación confirman el objetivo buscado en los algoritmos, es decir, asegurar como mínimo la GoS de todos los servicios.

Escenario de cuatro servicios con tráfico no balanceado

En este caso el radio celular calculado es de 475, siendo los parámetros de GoS los mismos que en el apartado anterior. Los valores de la probabilidad de pérdida simulada se ofrecen en la tabla 5.6.

| Servicio | Llamadas Ofrecidas | Llamadas Cursadas | Llamadas Perdidas | Probabilidad de Pérdida |
|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|
| Voz 12.2 Kbps | 54615.8 | 54595.6 | 19.6 | 0.00036 |
| Datos 64 Kbps | 4462.8 | 4446.8 | 16 | 0.00365 |
| Datos 144 Kbps | 2901.2 | 2878 | 23.2 | 0.00807 |
| Datos 384 Kbps | 1435 | 1362 | 73 | 0.05087 |

Tabla 5.6: Resultados de la simulación para cuatro servicios con tráfico no balanceado.

Nuevamente se observa que se cumple el valor de GoS de todos los servicios con lo que se vuelve a considerar válido el radio celular calculado.

5.2. Conclusiones sobre los algoritmos

Este capítulo ha mostrado un resumen de las pruebas exhaustivas a las que han sido sometidos los algoritmos reducido y combinado. Los ejemplos han sido configurados de manera que representan de forma fiable al conjunto de las pruebas por lo que los resultados son

extrapolables a todos los escenarios posibles.

Se ha demostrado que el algoritmo combinado proporciona mejores resultados que el resto en todos los casos y que el algoritmo reducido calcula el radio celular con exactitud suficiente cuando cada clase de servicio está representada por un único tipo de servicio, es decir, si no se consideran diferentes velocidades.

Se considera que ha quedado suficientemente probado a lo largo de los estudios que las asignaciones arbitrarias de los factores de carga conducen a valores del radio celular que distan mucho de los valores óptimos.

Los valores de radio celular calculado mediante los algoritmos reducido y combinado han sido probados mediante simulaciones con el objeto de verificar la fiabilidad de los resultados, obteniendo la confirmación de la validez de los mismos.

Por todo ello consideramos que los algoritmos desarrollados suponen una significativa contribución al diseño de redes móviles bajo tecnología WCDMA, proporcionando una metodología objetiva para el cálculo del radio celular, principalmente bajo condiciones de alta carga.

Capítulo 6

Diseño e Implementación de una Herramienta para la Planificación Estratégica de Redes Móviles UMTS (DIDERO)

6.1. Introducción a la herramienta

El presente trabajo de Tesis Doctoral tiene sus comienzos en el proyecto denominado *Diseño y Dimensionamiento de Redes Móviles de 3G, DIDERO 3G*¹ realizado dentro del Plan Nacional de I+D, continuado posteriormente dentro del proyecto del V Programa Marco *REPOSIT, Real Time Dynamic Bandwidth Optimisation in Satellite Networks*² como parte de las tecnologías de acceso a la red troncal por satélite y finalizado dentro de los proyectos *Desarrollo e Implementación de una herramienta para el diseño y dimensionamiento de redes INTERNET de tercera generación* dentro del Plan Nacional de I+D³ y la red de excelencia EURO-NGI⁴

El objetivo inicial del proyecto *DIDERO* consistía en la especificación, diseño e implementación de una herramienta estratégica para el diseño de la parte troncal, *Core Network*, de una red terrestre UMTS a partir de medidas estadísticas del tráfico de la red de acceso *UTRAN*. Sin embargo los primeros estudios desvelaron que la topología, diseño y estructura del *Core Network* dependían no sólo de los valores de tráfico, sino también de la propia estructura de la red de acceso. Por esta razón, y por que se ha observado que la tendencia en las redes modernas de telecomunicación es la de disponer de diversas tecnologías de acceso bajo un *Core Network* común, se decidió derivar el objetivo inicial hacia la red de acceso, desarrollando una herramienta estratégica para el conjunto de la red de acceso. La herramienta considera el diseño tanto del despliegue celular como de la estructura jerárquica de la red de acceso, es decir multiplexores y controladores (RNC). El diseño de la estructura de acceso se realiza considerando una área geográfica extensa, del orden de una o varias provincias, con

¹Proyecto TIC 2000-1276

²Proyecto IST-2001-34692

³TIC2003-05061

⁴ist-50/7613

todos los pueblos y ciudades que lo compongan. La herramienta DIDERO 3G es producto de varios años de investigación y su estructura es razonablemente compleja. Por motivos de simplicidad remitimos al lector interesado al documento completo de la tesis doctoral, exponiendo únicamente en este resumen un ejemplo de escenario de planificación.

6.2. Estudio Comparativo entre los algoritmos en un escenario de planificación.

En esta sección se ejecuta un escenario de planificación para un operador de telecomunicaciones que desea desplegar su red de tercera generación en las veintiuna localidades más importantes de la región de Cantabria. En el escenario vamos a considerar tres servicios, voz a 12.2 Kbps, y datos a 64 y 144 Kbps. Los valores de los parámetros utilizados en el escenario están descritos en la memoria.

Las ciudades donde se realiza el escenario de planificación se muestran en la tabla 6.1.

| Municipio - Ciudad | Radio (m) | Población |
|----------------------------|-----------|-----------|
| Ampuero | 1100 | 3379 |
| Bezana | 850 | 5276 |
| Cabezón de la Sal | 2500 | 6752 |
| Camargo | 2000 | 20451 |
| Castro Urdiales | 1500 | 53376 |
| Colindres | 1850 | 5640 |
| El Astillero | 1500 | 32587 |
| Enmedio | 1501 | 3869 |
| Laredo | 3000 | 12950 |
| Los Corrales | 1500 | 9820 |
| Miengo | 750 | 2974 |
| Pielagos | 1500 | 9519 |
| Polanco | 1800 | 3806 |
| Reinosa | 3500 | 12593 |
| San Vicente de la Barquera | 1250 | 4515 |
| Santa María Cayómn | 1500 | 6016 |
| Santander | 4000 | 191079 |
| Santillana | 1975 | 3903 |
| Santoña | 2000 | 10728 |
| Suances | 1150 | 5855 |
| Torrelavega | 1500 | 60023 |

Tabla 6.1: Ciudades o municipios considerados en el escenario.

Se procede a realizar el despliegue de 3G en todas las ciudades con los algoritmos simple, reducido y combinado, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 6.2.

La tabla 6.2 ofrece resultados muy significativos que deben ser tratados en profundidad. El primero de ellos se refiere a la utilización de las fórmulas de Erlang o Engset en los cálculos del radio celular. Observamos que en este escenario el número de localizaciones o Nodos B

| Ciudad | A. Simple | | A. Iterativo | | A. Reducido | | A. Combinado | |
|----------------------------|-----------|--------|----------------------|-----------------------|-------------|--------|----------------------|----------------------|
| | Erlang | Engset | Erlang, Iters=864 | Engset, Iters=1677 | Erlang | Engset | Erlang, Iters=360 | Engset, Iters=370 |
| Ampuero | 7 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Bezana | 17 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Cabezón | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Camargo | 27 | 18 | 17 | 16 | 17 | 16 | 17 | 16 |
| Castro Urdiales | 9 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Colindres | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| El Astillero | 8 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Enmedio | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Laredo | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Los Corrales | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Miengo | 5 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Piélagos | 17 | 16 | 16 | 12 | 16 | 13 | 16 | 13 |
| Polanco | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Reinosa | 11 | 9 | 8 | 7 | 8 | 7 | 8 | 7 |
| San Vicente | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Santa M ^a Cayón | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Santander | 89 | 79 | 74 | 70 | 71 | 70 | 71 | 70 |
| Santillana | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Santoña | 10 | 7 | 5 | 5 | 7 | 5 | 7 | 5 |
| Suances | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Torrelavega | 50 | 47 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Suma | 303 | 261 | 236 | 225 | 234 | 226 | 234 | 226 |

Tabla 6.2: Número de Nodos B obtenidos en el despliegue regional con los diferentes algoritmos.

necesarios para proporcionar la cobertura es un 5% inferior en el caso de utilización de la fórmula de Engset, lo que en los estudios estratégicos se traduce en una reducción significativa en los costes. El segundo resultado, y quizás el más importante desde el punto de vista de este trabajo, consiste en la diferencia entre los resultados obtenidos con los algoritmos simple y reducido o combinado. El número de Nodos B obtenido con el algoritmo simple es cerca de un 16% superior al caso de los algoritmos reducido y combinado, lo que en términos estratégicos supone graves fallos a la hora de estimar los costes de inversión. Por otra parte, este aumento del número de Nodos B repercute claramente en el dimensionamiento de la parte fija de acceso a la red, principalmente en el dimensionamiento del número de multiplexores y controladores necesarios. En tercer lugar se aprecia que el algoritmo reducido proporciona resultados similares a los de los algoritmos combinados e iterativo, lo que vuelve a demostrar que en el caso de considerar un único servicio por cada clase, este algoritmo proporciona resultados suficientemente precisos.

Una vez realizado el despliegue celular se debe realizar la planificación de los multiplexores. Se considera que la capacidad máxima de cada multiplexor es de 26 Nodos B, que se encuentra en el lugar donde se instala el equipo del multiplexor⁵. Se establece una distancia mínima entre los multiplexores de 10 Km y con un tráfico mínimo necesario de 4500 Kbps

⁵Obtenido de conversaciones privadas con Ericsson Radio.

para que un Nodo B se considere candidato a ser multiplexor. Con estas premisas, es evidente que el número de multiplexores necesarios en el algoritmo simple es de 11 multiplexores, mientras que en el caso de los algoritmos iterativo, reducido y combinado es de 9 multiplexores. Los resultados del cálculo de los multiplexores se ofrecen en las tablas 6.3 para el algoritmo simple, 6.4 para el iterativo y 6.5 para los algoritmos combinado y reducido ⁶.

| Cluster | Ciudad | Número de Nodos B Asignados | Tráfico en Kbps |
|---------|---------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 | Torrelavega-1 | 25 | 142374 |
| 2 | Laredo | 25 | 135101 |
| 3 | Santander-1 | 25 | 161546 |
| 4 | Camargo | 25 | 157254 |
| 5 | Torrelavega-2 | 25 | 156927 |
| 6 | Santander-2 | 25 | 159159 |
| 7 | Piélagos | 25 | 145519 |
| 8 | Reinosa | 14 | 79783 |
| 9 | Santander-3 | 25 | 155601 |
| 10 | El Astillero | 22 | 133933 |
| 11 | Suances | 14 | 79846 |
| Total | | 250 | 1507043 |

Tabla 6.3: Distribución de Multiplexores para el algoritmo simple.

| Cluster | Ciudad | Número de Nodos B Asignados | Tráfico en Kbps |
|---------|---------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 | Laredo | 25 | 154422 |
| 2 | Camargo | 25 | 185818 |
| 3 | Santander-1 | 25 | 195501 |
| 4 | Torrelavega-1 | 25 | 188795 |
| 5 | Torrelavega-2 | 25 | 172674 |
| 6 | Piélagos | 25 | 176350 |
| 7 | Santander-2 | 25 | 185215 |
| 8 | Santander-3 | 25 | 181534 |
| 9 | Reinosa | 16 | 104742 |
| Total | | 216 | 1545051 |

Tabla 6.4: Distribución de Multiplexores para el algoritmo iterativo.

Al número total de Nodos B de la tercera columna de las tablas de los multiplexores se debe añadir el número de multiplexores para obtener el total de Nodos B del despliegue⁷. Se

⁶Debido a que los algoritmos reducido y combinado proporcionan idénticas soluciones, los resultados se presentan dentro de las mismas tablas.

⁷Por ejemplo, en el caso del algoritmo iterativo, consiste en 216 Nodos B + 9 Multiplexores = 225 Nodos B Totales.

| Cluster | Ciudad | Número de Nodos B Asignados | Tráfico en Kbps |
|---------|---------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 | Laredo | 25 | 153595 |
| 2 | Santander-1 | 25 | 191237 |
| 3 | Torrelavega-1 | 25 | 187515 |
| 4 | Camargo | 25 | 183756 |
| 5 | Torrelavega-2 | 25 | 170445 |
| 6 | Santander-2 | 25 | 187960 |
| 7 | Piélagos | 25 | 177040 |
| 8 | Santander-3 | 25 | 181146 |
| 9 | Reinosa | 17 | 109558 |
| Total | | 217 | 1542252 |

Tabla 6.5: Distribución de Multiplexores para los algoritmos reducido y combinado.

puede observar que los valores de tráfico total difieren ligeramente entre los algoritmos, concretamente en un 2.5 % en el caso del algoritmo simple y en un 0.18 % en el caso del reducido y el combinado, tomando como referencia el algoritmo iterativo. Esto es debido a que cuando se calcula el tráfico ofrecido en cada célula, se considera la densidad media en la célula y no el número de habitantes total, con lo que se producen estas diferencias que no son significativas a la hora de realizar estudios estratégicos.

En todo caso debemos apreciar que en el caso del algoritmo simple la aparición de dos nuevos multiplexores implica el aumento de los costes estratégicos de inversión, debido no sólo a la necesidad de instalar la infraestructura necesaria para el mantenimiento de estos equipos, sino que adicionalmente el *error* se propaga hacia el nivel de controladores, produciendo desviaciones de la configuración óptima, tal y como se analiza seguidamente.

Consideramos que cada controlador puede gestionar un máximo de 159 portadoras radio, considerando tres sectores por Nodo B, se obtiene que cada RNC puede gestionar 53 Nodos B. Si cada multiplexor tiene una capacidad máxima de 26 Nodos B, cada RNC puede gestionar como máximo 2 multiplexores. Con estas premisas el número de controladores necesarios para cubrir el despliegue es de 6 controladores, mientras que en el caso del resto de algoritmos es de 5 controladores.

En el caso del despliegue de controladores no se considera un umbral de tráfico mínimo para su selección, aunque sí se pretende que se encuentren lo más alejados posible para establecer una estructura uniforme. Con estas premisas se realiza el despliegue, mostrándose los resultados en las tablas 6.6 para el algoritmo simple, 6.7 para el algoritmo iterativo y 6.8 para los algoritmos reducido y combinado.

| Cluster de Controlador | Ciudad | Número de Multiplexores Asignados | Tráfico en Kbps |
|------------------------|--------------|-----------------------------------|-----------------|
| 1 | Santander | 1 | 317147 |
| 2 | Torrelavega | 1 | 299301 |
| 3 | El Astillero | 1 | 291187 |
| 4 | Laredo | 0 | 135101 |
| 5 | Piélagos | 1 | 225302 |
| 6 | Suances | 1 | 239005 |
| D. Mínima-RNC Km | 8.199 | D Total Km | 118.33 |

Tabla 6.6: Distribución de RNC's para el algoritmo simple.

| Cluster de Controlador | Ciudad | Número de Multiplexores Asignados | Tráfico en Kbps |
|------------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------|
| 1 | Santander | 1 | 380716 |
| 2 | Torrelavega | 1 | 361469 |
| 3 | Piélagos | 1 | 362168 |
| 4 | Laredo | 1 | 335956 |
| 5 | Reinosa | 0 | 104742 |
| D. Mínima-RNC Km | 8.262 | D Total Km | 171.27 |

Tabla 6.7: Distribución de RNC's para el algoritmo iterativo.

| Cluster de Controlador | Ciudad | Número de Multiplexores Asignados | Tráfico en Kbps |
|------------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------|
| 1 | Santander | 1 | 379197 |
| 2 | Torrelavega | 1 | 357960 |
| 3 | Piélagos | 1 | 360796 |
| 4 | Laredo | 1 | 334741 |
| 5 | Reinosa | 0 | 109558 |
| D. Mínima-RNC Km | 8.553 | D Total Km | 170.26 |

Tabla 6.8: Distribución de RNC's para los algoritmos reducido y combinado.

En las figuras 6.1 y 6.2 se observa la clara diferencia entre el algoritmo simple y el reducido en el anillo de controladores, no sólo en cuanto al número de controladores, sino en cuanto a su distribución. Las distribuciones obtenidas mediante los despliegues celulares de los algoritmos iterativo, reducido y combinado son más homogéneas en el territorio que la del algoritmo simple.

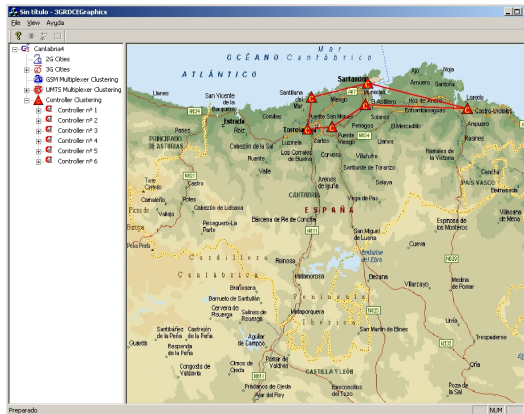


Figura 6.1: Despliegue de Controladores en Cantabria para el algoritmo simple.

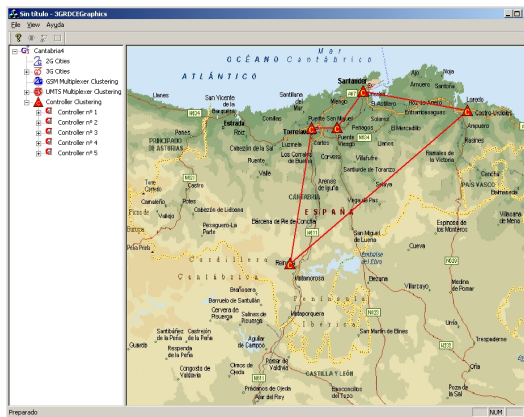


Figura 6.2: Despliegue de Controladores en Cantabria para el algoritmo reducido.

6.3. Justificación de la Necesidad de Algoritmos de Cálculo Semióptimo.

En la sección anterior se ha desarrollado un ejemplo de planificación de la red de acceso UTRAN considerando un escenario multiservicio. Se ha podido observar que el radio celular influye de manera crítica en la estructura de la red de acceso por lo que su cálculo es un problema básico en la planificación estratégica de redes.

Si por ejemplo realizamos una estimación genérica de costes, asignando una unidad de coste a cada Nodo B, 10 unidades a los multiplexores y 50 unidades de coste a los RNC's obtenemos los valores que se ofrecen en la tabla 6.9.

Los costes asignables al despliegue usando el algoritmo simple son un 15% superiores a los del resto de algoritmos lo cual es un error considerable en términos estratégicos. Extrapolando estos resultados a un modelo de costes basado en elementos como el LRIC o TELRIC, puede resultar que debido a este error se tome una decisión estratégica equivocada como puede ser

| Sección | Coste A. Simple | Coste A. Iterativo | Coste A. Reducido |
|----------------|-----------------|--------------------|-------------------|
| Nodos B | 261 | 225 | 226 |
| Multiplexores2 | 110 | 90 | 90 |
| RNC's | 300 | 250 | 250 |
| Total | 671 | 565 | 566 |

Tabla 6.9: Distribución de costes para los algoritmos.

la eliminación de servicios de la cartera del operador, el desplazamiento del B.E.P de tal manera que la red no sea viable, o que las tarifas de los servicios ofrecidos al cliente sean tan elevadas que el porcentaje de penetración de los servicios sea ínfimo. En cualquier caso serán decisiones tecno-económicas que estarán basadas en datos objetivamente inexactos debido a la falta de optimización del radio celular. Por estas razones, y como corolario de este capítulo debemos concluir que el cálculo óptimo del radio celular es un factor crítico en la planificación estratégica de redes móviles, y por lo tanto resulta imprescindible el disponer de algoritmos para su cálculo óptimo como los que son presentados en esta tesis doctoral.

Capítulo 7

Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo

7.1. Conclusiones Finales

La tesis doctoral desarrollada se encuentra dividida en dos partes diferentes pero altamente interrelacionadas. La primera parte consiste en el desarrollo de un algoritmo eficiente para el cálculo del radio celular en sistemas WCDMA, considerando principalmente las limitaciones por carga de tráfico. La segunda parte consiste en el desarrollo de una herramienta de planificación de la red de acceso UTRAN, bajo criterios estratégicos, donde se aplican los resultados obtenidos en la primera parte. A continuación se hace un resumen de las contribuciones y conclusiones extraídas en la presente tesis.

La contribución principal de la primera parte de esta tesis consiste en establecer una propuesta de un modelo matemático para el cálculo del radio celular en entornos multiservicio, que aprovecha la cultura y el conocimiento existente en esta materia en redes fija. Este modelo matemático implementado en forma del llamado *algoritmo reducido* y descrito en el capítulo 4, ha sido probado mediante la comparación con otros algoritmos de planificación mostrándose superior a ellos en términos de eficiencia en la mayoría de los casos.

Se ha comprobado que existen casos donde el algoritmo reducido no proporciona el valor óptimo del radio celular. Para esos casos se ha desarrollado, implementado y verificado satisfactoriamente el algoritmo denominado *algoritmo combinado*. Este algoritmo, combinación del algoritmo reducido y un algoritmo iterativo, obtiene en todos los casos el valor óptimo del radio celular, presentando evidentes mejores prestaciones en términos de iteraciones con los algoritmos primitivos.

Los resultados de los cálculos del radio celular por los algoritmos desarrollados en esta tesis han sido exhaustivamente probados tanto mediante la comparación de los resultados entre ellos como mediante simulaciones, con diversas herramientas desarrolladas al efecto.

En cuanto a la segunda parte de la tesis, se ha aplicado una metodología que está siendo desarrollada en otra tesis doctoral del Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad de Cantabria para la creación de herramientas de planificación basadas en los denominados obje-

tos TDDO. Esta metodología, presentada en diversos congresos nacionales e internacionales, permite la realización de herramientas de planificación de redes de telecomunicación en muy cortos intervalos de tiempo, así como el reutilización de gran parte de módulos desarrollados en otras herramientas, ya sean de red fija como de red móvil, como se ha expuesto en el capítulo 6.

En el capítulo 3 se expusieron diversas herramientas de planificación de redes celulares basadas en el sistema WCDMA, pero tal y como se analizaba, ninguna de ellas estaba orientada al estudio previo de la red, es decir, a la fase de toma de decisiones, en el dimensionado propio de la red. Se ha detectado por lo tanto la carencia de herramientas que soporten decisiones tecno-económicas. En esta línea, esta tesis contribuye claramente a suplir este déficit mediante la herramienta DIDERO 3G. Esta herramienta permite estimar los elementos de red necesarios en un despliegue a nivel regional o incluso nacional, sin necesidad de una ingente cantidad de datos de entrada con respecto a las situaciones geográficas, demográficas o topográficas de las ciudades, municipios o regiones bajo estudio. Esta herramienta permite estudiar la variación de la estructura de acceso cuando un operador añade o elimina servicios o cuando cambia la demanda, ya sea por un mayor número de tasas de llamada, o de su duración, o bien por el cambio de situación demográfica.

Por otra parte la herramienta DIDERO 3G, ha permitido demostrar la importancia que tiene realizar una correcta estimación del radio celular, puesto que, mediante el ejemplo desarrollado en el capítulo 6, se ha observado el aumento en los elementos de red debido al incorrecto dimensionado. Este argumento nos permite remarcar de nuevo la importancia de la contribución del algoritmo reducido al diseño de redes WCDMA.

7.2. Publicaciones.

Los trabajos y estudios desarrollados en la presente Tesis Doctoral han sido presentados en diversos congresos nacionales e internacionales, que en cierta manera, avalan la calidad del trabajo presentado. Muchas de estas publicaciones se encuentran ya referenciadas en la bibliografía de este trabajo, sin embargo realizamos aquí un breve resumen.

- *Methods and Solutions for Network Planning Tools*, Mobile Communication Summit 2000, Information Society Technology (IST).
- *Design of Telecommunication Network Planning Tools and their Application in Tele-learning*, Workshop on Network Traffic Engineering, 2001
- *New Trends in design of Network Planning Tools*, 40 European Telecommunication Congress, FITCE 2001 y artículo en The Journal of the Institution of British Telecommunication Engineers, 2001
- *DIDERO A tool for Strategic Network Planning of hybrid 2G/3G Mobile Networks* Congreso VDE 2002 y Libro Networkds 2002 páginas 189-196.
- *A bottom up model for cost calculation of telecommunication network interconnection*, 9TH International Conference on Telecommunication Systems, Modelling and Annalasis, 2002.

- *DIDERO 3G Strategic Network Planning Tool for 3G Mobile Networks*, 6TH World Multiconference on Systemics Cybernetics and Informatics, 2002.
- *DIDERO 3G, Herramienta para la planificación estratégica de redes móviles híbridas de 2G/3G*, XVII Symposium Nacional de la URSI, 2002.
- *DIDERO A tool for Strategic Network Planning of hybrid 2G/3G Mobile Networks*, 9TH International cultural and academic meeting of engineering students, ICAMES 2003.
- *Application of Strategic Planning methods to a 3Generation mobile network; the UMTS Case*, 42 European Telecommunication Congress, FITCE 2003 y artículo en The Journal of Communication Networks, Volumen 1 Parte 2 2003.
- *DIDERO 3G A Strategic Network Planning Tool for 3G Mobile Networks*, International Journal of Information Technology and Decision Making (IJITDM), Diciembre 2003.
- *Método para el diseño óptimo del radio celular en sistemas multiservicio WCDMA*, XVIII Symposium Internacional de la URSI, 2003.
- *Modelos de Coste y Regulación en Redes y Servicios de Telecomunicación*, XIX Symposium Internacional de la URSI, 2004.
- *Desarrollo de un Simulador Celular a Nivel de Llamada para WCDMA*, XIX Symposium Internacional de la URSI, 2004.
- *Analytical Algorithm for WCDMA Cell Size Determination in Multiservice Scenarios* IEEE Communications Letters. *Bajo Revisión*.