

DIMENSIONADO DE REDES MÓVILES DE SEGUNDA GENERACIÓN Y SU APLICACIÓN EN MODELOS DE COSTES

1. Introducción

Atendiendo al ciclo de vida de las redes de comunicaciones, observamos que las redes GSM se encuentran actualmente en la etapa de saturación, y por tanto, la mayor parte están ya plenamente desarrolladas. Como consecuencia de esta saturación, los estudios para consolidar estas redes deben centrarse en nuevos temas complementarios a la planificación operativa de la red, realizados desde puntos de vista técnicos y económicos. Estos nuevos temas se pueden dividir en dos clases, la promoción e implementación de nuevos servicios, tanto a nivel de servicio portador como de servicio final, y las acciones en el campo de la regulación de las telecomunicaciones.

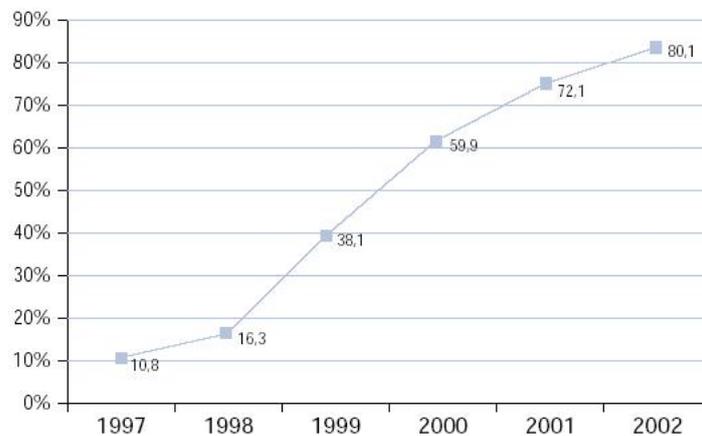


Figura 1: Evolución de la Tasa de penetración en Telefonía Móvil automática (Fuente: [1])

Respecto a las acciones en el campo de la regulación de las telecomunicaciones cabe resaltar que a día de hoy el mercado se encuentra en su mayor parte liberado y regido bajo la ley de la libre competencia (sin considerar las licencias otorgadas por las correspondientes entidades nacionales). En su mayor parte las tarifas se encuentran sujetas a la competencia existente entre los distintos operadores, aunque actualmente se producen numerosos intentos por parte de las Autoridades Reguladoras Nacionales (*National Regulatory Authorities: NRA's*) para fijar topes a los precios correspondientes a la realización y terminación de las llamadas, así como a las diversas interconexiones entre operadores. Estas regulaciones se aplican con mayor rotundidad a los denominados operadores dominantes.

Precisamente el proporcionar una herramienta efectiva con la que hacer análisis tecno-económicos, ya sea para los operadores o para los organismos reguladores, es el principal objetivo de este proyecto. Para conseguirlo se utiliza el estándar de costes FL-LRAIC (*Forward Looking Long Run Average Incremental Costs*), empleando el modelo de costes *bottom-up*, en línea con la Recomendación de la Comisión Europea [2]. Los modelos económicos *bottom-up* basados en la ingeniería estudian los costes de cada elemento de la red para obtener por agregación el coste global, y sirven de ayuda para identificar ineficiencias derivadas de la contabilidad de costes corrientes, tales como dimensionados de red excesivos o arquitecturas de red no óptimas para un operador eficiente.

Tal y como sucede con la red fija, para realizar este tipo de estudios se requiere conocer el diseño y el dimensionado de toda la red desde la propia célula del Subsistema de la Estación Base (*BSS: Base Station Subsystem*), hasta alcanzar el Subsistema de Red y Conmutación (*NSS: Network Switching Subsystem*), incluyendo asimismo todos los elementos referidos a estos subsistemas. Sin embargo, poder analizar toda la red de un país es prácticamente imposible, ya que se requieren enormes cantidades de información muy precisa y detallada. También eleva la complejidad del estudio el analizar y evaluar cada célula dentro de todo el territorio nacional, ya que se ve influido

por las diversas características topológicas y demográficas.

Por todo ello, en este proyecto se ha realizado un modelo GSM que permite aproximar una red entera basándose en diversos escenarios representativos conformados por sus correspondientes parámetros. Así pues, el estudio de estos escenarios, con sus correspondientes particularidades, nos proporcionará un completo y objetivo punto de vista de todo el despliegue celular. Dicho modelo GSM se ha desarrollado en numerosos algoritmos implementados en una herramienta mediante Microsoft Visual C++, de tal modo que la generación de resultados se obtiene de forma veloz y requiere de una información mucho más reducida que en las herramientas convencionales.

2. Modelo de Costes

Como se puede deducir, el establecimiento de las diversas tarifas constituye un elemento de confrontación entre los diversos integrantes del mercado de las telecomunicaciones (Operadores de red, proveedores de servicios, consultorías de telecomunicación). Todo ello sin olvidarnos de las autoridades nacionales reguladoras, en España la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, que vigilan el cumplimiento del proceso de liberalización del mercado según las correspondientes directivas europeas [3] y de la vigilancia de la competencia efectiva.

La resolución de estos conflictos implica el establecimiento de precios y tarifas orientadas a costes, es decir, que el precio de un determinado servicio sea fiel reflejo del coste de su realización, con los correspondientes márgenes de beneficios. Los métodos y modelos para establecer estos costes son los mecanismos que disponen los diversos integrantes del mercado para poder justificar sus precios y sus decisiones, siempre en su propio beneficio. De lo anterior se deduce la obligatoria necesidad de disponer de modelos de costes efectivos para poder realizar la toma de decisiones estratégicas acertadas que conduzcan a un mercado eficiente y, por lo tanto, al progreso del sector.

La evolución en el conocimiento de las redes de telecomunicación y los procedimientos de contabilización han producido diversos modelos de costes. En este resumen del Proyecto Fin de Carrera se ofrece una breve reseña de los principales [4], [5].

- *Fully Allocated Costs*, (FAC). Utilizado principalmente en mercados de monopolio. Se basa en el estudio de la contabilidad financiera del operador de telecomunicación y, por lo tanto, considera los costes históricos¹ de la red. Asigna los costes totales a los servicios y tiene un alto grado de arbitrariedad.
- *Activity Based Costs* (ABC). Es una modificación del FAC que toma en cuenta las actividades de la empresa, y por lo tanto reduce su arbitrariedad.
- *Current Cost Accounting* CCA. Estima el coste de reemplazar la infraestructura de red existente por la tecnología actual con los precios de mercado, considerando costes corrientes en vez de históricos. Su desventaja es que no establece directivas para el proceso de asignación de los costes.
- *Short-Long Run Marginal Accounting* (SRMA y LRMA): Considera el coste de proveer la siguiente *unidad* del servicio. Aplicable principalmente a los servicios que dependen de la capacidad de la red. El modelo *Short Run*, o corto plazo, no considera variaciones en la inversión, por lo que se debe aplicar a servicios que varían en cortos plazos temporales (días, meses). El modelo *Long Run* si considera variaciones de la inversión en elementos de red.
- *Long Run Incremental Cost* (LRIC). El modelo de costes incrementales a largo plazo no se dirige a la siguiente unidad del servicio como el LRMA sino que considera los incrementos del servicio con el fin de amortiguar picos de coste por la adquisición de nuevos equipos y aprovechar las economías de escala. Tiene dos vertientes, Total Element LRIC (TELRIC), basado en los elementos de red y que fue desarrollado por la FCC de Estados Unidos, y Total Service LRIC, que considera cada servicio en su conjunto como el factor de incremento.

Esta última metodología, LRIC, ha sido recomendada por la Comisión Europea para determinar los costes de los operadores dominantes, obligados a orientar a costes sus precios de interconexión [7]. Sin embargo, dentro de estas metodologías se aprecian dos perspectivas contrapuestas que se orientan a asegurar que los precios o tarifas se encuentran orientados a los costes.

¹En el estándar de costes históricos se imputa a cada elemento de red el coste en el momento de su adquisición por lo que se realiza una valoración a la alza de los mismos en el momento actual. Los costes corrientes, por el contrario, estudian la evolución del activo a lo largo del tiempo, [6].

- *Top-Down*. Se parte de la información financiera contable de la empresa. En primer lugar se contabiliza el conjunto de la red y en segundo lugar se asignan los costes a los correspondientes elementos de red. Esta metodología se muestra en la figura 2.

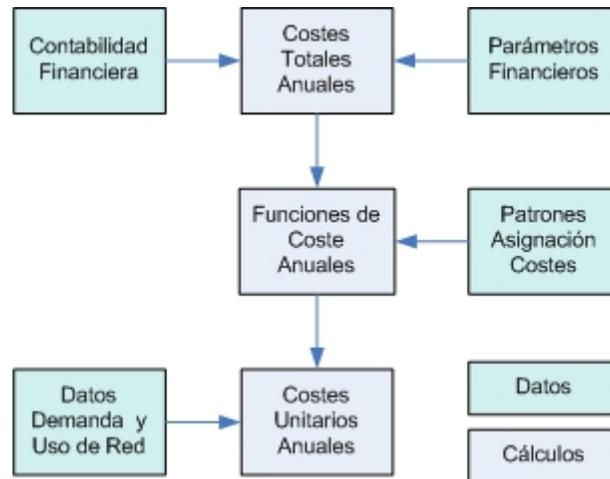


Figura 2: Modelo de cálculo Top-Down. Fuente: [8].

- *Bottom-Up*. Se basa en la demanda de tráfico, en el diseño de red y en los costes unitarios. Partiendo de un diseño de red, se realiza la asignación de coste a cada elemento individualmente. La figura 3 muestra un esquema de aplicación de este método.

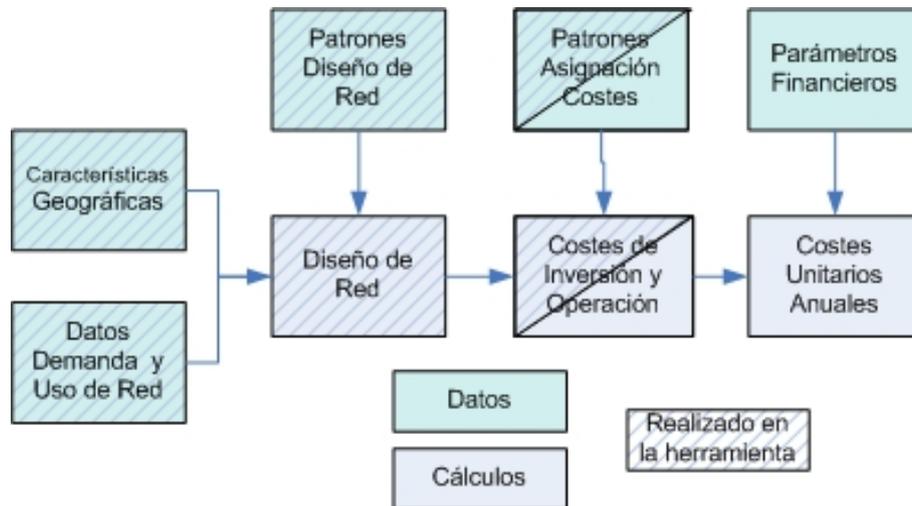


Figura 3: Modelo de cálculo Bottom-Up. Fuente: [8].

La información financiera contable se basa en los costes históricos, por lo que las aproximaciones Top-Down no reflejan completamente la situación actual, con lo que no se puede establecer una referencia objetiva para estudiar los precios y tarifas de los servicios de telecomunicación ².

Por ello, este proyecto se ha basado en la aproximación *Bottom Up*. Atendiendo a la figura 3, se puede afirmar que en este proyecto se han desarrollado la mayor parte de las fases de este modelo. En concreto, el objetivo de este proyecto alcanza hasta la mitad de la fase de 'costes de inversión y operación', ya que no se han tratado costes relativos al material o al personal utilizado. Para la realización de los estudios financieros se requerirá la utilización de otras herramientas, como pueden ser las hojas de cálculo.

²Por la misma razón, los métodos ABC y FAC tampoco sirven para establecer una referencia básica.

3. Modelo del cálculo del radio celular

El estudio del radio celular proporciona la información relativa a la cobertura radioeléctrica de una determinada Estación Base. El modelo que se presenta en este capítulo contempla parámetros de propagación radioeléctrica, estudios de movilidad y de tráfico, y el cumplimiento del Grado de Servicio (*GoS*, *Grade of Service*) del sistema, si bien este resumen del Proyecto Fin de Carrera no se extenderá en su desarrollo al ser un campo más estudiado y conocido que el resto de modelos presentados en este trabajo.

La predicción de la cobertura y el cálculo del radio celular es el núcleo de la actividad de diseño y planificación radio. En este punto se plantean los balances energéticos de los enlaces y se utilizan los modelos de propagación para la predicción de la pérdida básica en la célula y, en consecuencia, de la cobertura.

Para poder analizar el tráfico en una célula GSM se deben considerar principalmente dos aspectos. En primer lugar se debe estudiar un modelo de movilidad que permita representar el movimiento de los usuarios dentro de una célula, y en segundo lugar, se debe obtener el tráfico de usuario en una célula con traspasos y, a su vez, calcular las probabilidades de bloqueo/pérdida resultantes. El tratamiento de la movilidad debe incluir las acciones inherentes a su función, es decir, la conexión / desconexión, la actualización de la posición y los avisos, ya que todas ellas repercuten en el dimensionamiento de los canales de control y en los traspasos de llamadas, los cuales inciden en el dimensionado de los canales de tráfico.

Este modelo permite el uso de distintas densidades de población en función del escenario que se desee cubrir. Cada ciudad genérica presenta características relativas al tipo de ciudad (grande, mediana o pequeña), a la distribución de la densidad de usuarios, y a la concentración de edificios (alta o baja) con su altura media correspondiente.

El tiempo de ocupación de un canal es un valor muy importante en el cálculo de las probabilidades de bloqueo. Se supone que al originar una llamada en una célula y conseguir un canal, la llamada mantiene el canal hasta que se finaliza o el móvil se traslada a otra célula. Por lo tanto, el tiempo de ocupación del canal en una célula (T_{ocup}) es el tiempo de duración de la llamada, o bien, el tiempo de residencia del móvil en la célula.

Una llamada generada en una determinada célula puede concluir en esta célula o ser objeto de traspaso a otra u otras células. Toda llamada puede finalizar porque concluye su tiempo de duración o porque hay un fallo de traspaso. Para paliar este inconveniente, puede contemplarse la posibilidad de destinar canales de las células para atender exclusivamente a llamadas de traspaso, ya que, desde un punto de vista subjetivo, es más molesto que se corte una comunicación que ya se está realizando, a que simplemente no se pueda realizar una nueva llamada.

Se considera entonces una Estación Base que dispone de C canales, o slots, de los cuales C_h se encuentran reservados únicamente para la realización de traspasos, mientras que los $C - C_h$ restantes pueden ser ocupados o bien por llamadas nuevas en la célula o bien por llamadas traspasadas. A partir de ello se obtienen distintas probabilidades de bloqueo para las llamadas nuevas y para las traspasadas [9]. En la realización de este cálculo de probabilidades se supone una estructura celular uniforme en la que los valores de las tasas de llegadas de llamadas y tiempos medios de referencia son iguales para todas las células. Asimismo, se asume que los procesos de aparición de llamadas, tanto nuevas como traspasadas, son Poissonianos.

Definiendo el estado E_j de una célula de tal manera que existan j llamadas en progreso en la célula en ese instante, se puede definir también P_j , que es la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado E_j . De acuerdo con el diagrama de estados de la figura 4 se pueden plantear las ecuaciones de todos los estados, donde Λ y Λ_h son las tasas totales de llegada de llamadas nuevas y de llamadas traspasadas respectivamente, y μ_{ocup} es el tiempo de ocupación de un canal en una célula.

$$P_j = \begin{cases} \frac{\Lambda + \Lambda_h}{\mu_{ocup}} \cdot P_{j-1} & j = 1, 2, \dots, C - C_h \\ \frac{\Lambda_h}{\mu_{ocup}} \cdot P_{j-1} & j = C - C_h + 1, \dots, C \end{cases} \quad (3.1)$$

Con la condición normalizada de que la suma de las probabilidades de todos los estados debe ser la unidad, se obtiene la distribución de probabilidad:

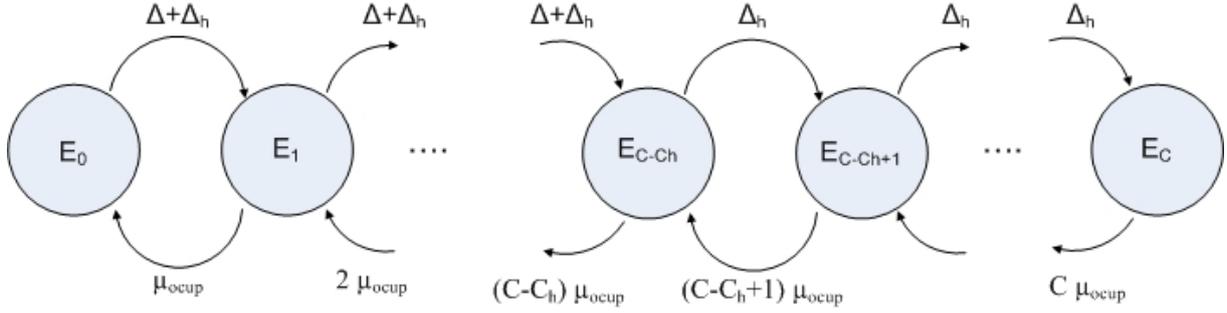


Figura 4: Diagrama de estados del modelo de tráfico. (Fuente [9]).

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{C-C_h} \frac{(\Lambda + \Lambda_h)^k}{k! \cdot \mu_{ocup}^k} + \sum_{k=C-C_h+1}^C \frac{(\Lambda + \Lambda_h)^{C-C_h} \cdot \Lambda_h^{k-(C-C_h)}}{k! \cdot \mu_{ocup}^k} \right]^{-1} \quad (3.2)$$

$$P_j = \begin{cases} \frac{(\Lambda + \Lambda_h)^j}{j! \cdot \mu_{ocup}^j} \cdot P_0 & j = 1, 2, \dots, C - C_h \\ \frac{(\Lambda + \Lambda_h)^{C-C_h} \cdot \Lambda_h^{j-(C-C_h)}}{j! \cdot \mu_{ocup}^j} \cdot P_0 & j = C - C_h + 1, \dots, C \end{cases} \quad (3.3)$$

La probabilidad de bloqueo para una llamada es la suma de las probabilidades de que el estado de la estación base sea igual o mayor que $C - C_h$. Y la probabilidad de fallo en el traspaso, es decir, que las llamadas traspasadas queden bloqueadas, se corresponde con la probabilidad del estado C .

A partir de dos de los aspectos primordiales del diseño de la red, la existencia de cobertura radio y la disponibilidad de recursos, se establece un primer grado de calidad de servicio denominado Grado de Servicio (*GoS, Grade of Service*), que es la probabilidad porcentual de que no pueda iniciarse una llamada, sea por falta de cobertura o por carencia de canales.

Finalmente, el valor del tráfico cursado por una célula, conformado tanto por el tráfico inicial como por el de traspaso es:

$$A_c = \Lambda \cdot T_{ocup} \cdot (1 - p_b) + \Lambda_h \cdot T_{ocup} \cdot (1 - p_{fh}) \quad (E) \quad (3.4)$$

Y el tráfico desbordado de dicha célula:

$$A_p = \Lambda \cdot T_{ocup} \cdot p_b + \Lambda_h \cdot T_{ocup} \cdot p_{fh} \quad (E) \quad (3.5)$$

En resumen, se ha obtenido el radio celular en función de sus características de propagación radio y se ha realizado un estudio de tráfico para la estación base, comprobando si cumple con el grado de servicio requerido. En caso negativo se deben establecer una serie de medidas en función de la banda de frecuencias sobre la que se esté trabajando. Dichas medidas se abarcan en el siguiente capítulo.

4. Modelo del despliegue celular

4.1. Introducción

Los operadores de telefonía móvil tienen asignadas por licencia administrativa una o dos bandas de frecuencias, es decir, 900 MHz, 1800 MHz o ambas. Si disponen de dos bandas distintas, utilizan una de ellas para el despliegue celular inicial, y emplean la segunda para cubrir aquellas zonas en las que la capacidad de las Estaciones Base asignadas no es suficiente para cumplir con el Grado de Servicio requerido.

Este modelo considera ambas bandas, permite trabajar en cualquiera de ellas, e incluso, deja seleccionar que banda se quiere utilizar para el tráfico desbordado en el caso de trabajar con dos distintas. Por lo general, el modelo realiza la planificación básica en la banda de 900 MHz y utiliza la de 1800 MHz para el tráfico desbordado porque la primera presenta unas características de propagación radio mejores que la de 1800 MHz.

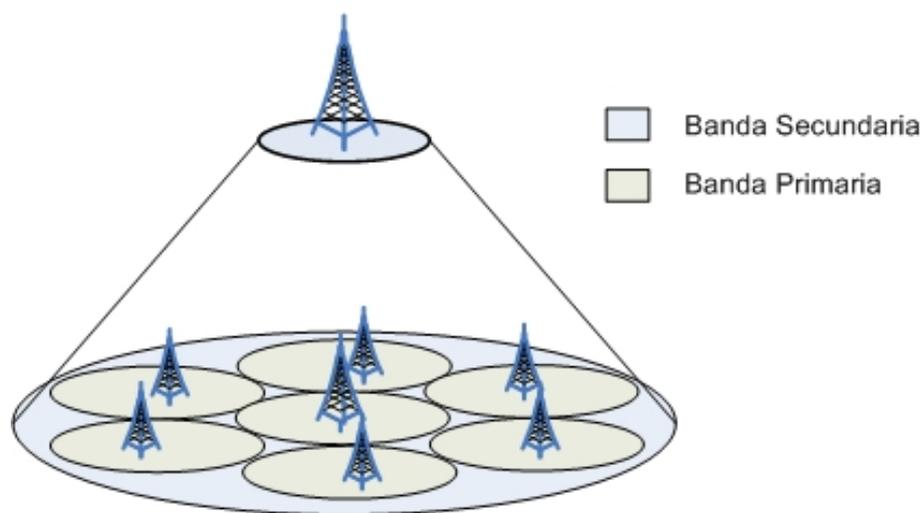


Figura 5: Esquema de la utilización de células paraguas para el tráfico desbordado

Con objeto de ahorrar costes de infraestructura, las BTS's de la segunda banda se sitúan en el mismo emplazamiento que una BTS del despliegue original. Debido a ello, al tratar con Estaciones Base de mayor radio celular, se consigue proporcionar servicio tanto al tráfico desbordado por la célula de su misma posición, como a parte (o a la totalidad) del tráfico desbordado por las células vecinas.

4.2. Selección de la Estación Base adecuada

Uno de los puntos de mayor importancia en la realización de esta herramienta se centra en la elección de la Estación Base más adecuada en función de las condiciones de propagación, de tráfico, y del tipo de despliegue que se desee realizar. Para ello, se dispone de un listado de los diversos tipos de BTS's disponibles con sus correspondientes parámetros. De manera reducida para este Resumen del Proyecto Fin de Carrera, se enumera que los parámetros requeridos para cada Estación Base son: Nombre y modelo de la Estación Base, n° de canales (máximos admitidos, reservados para handover, de señalización), potencia de transmisión, pérdidas (cables, combinador, multiacoplador de la antena), figura de ruido total del receptor, ganancias (preamplificador, antena receptora con diversidad en recepción, antena transmisora para los diversos casos), grado mínimo de sectorización, grado máximo de sectorización y coste o factor de prioridad. A excepción del coste, todos los parámetros se utilizan en la obtención del radio celular y la probabilidad de bloqueo.

El proceso para obtener la BTS más adecuada para el despliegue en una zona consiste en realizar una clasificación de las BTS's disponibles en función de si cumplen, o no, el Grado de Servicio. Llegado este punto se permite la realización de dos métodos de ordenación distintos: en función del máximo radio de cobertura y en función del coste.

4.2.1. Ordenación en función del máximo radio de cobertura

En este método, las BTS's que cumplen el Grado de Servicio se clasifican en orden decreciente en función de su radio de cobertura. De esta forma se selecciona aquella BTS que proporciona servicio a un área mayor, y que en consecuencia, en el despliegue celular, asegura un menor número de unidades para cubrir toda el área estudiada.

4.2.2. Ordenación en función del coste

Este método de ordenación considera más relevante el coste de la BTS que el radio de cobertura que proporciona. Este coste puede ser el coste unitario de la Estación Base (en moneda corriente), o un factor de preferencia a la hora de realizar el despliegue celular ³. Las Estaciones Base que cumplen el Grado de Servicio se ordenan en función de su coste total ⁴ en orden creciente.

4.3. Despliegue celular básico

El despliegue permite decantarse por la utilización de células omnidireccionales, forzando su utilización si así se requiere, aunque si ninguna BTS's cumple con el Grado de Servicio se debe recurrir al procedimiento de la sectorización de la Estación Base. Con este proceso se obtienen mejores resultados en términos de GoS para cada BTS.

La sectorización afecta al cálculo del radio celular en dos parámetros:

- M_T : Número de móviles presentes en el sector.

Asumiendo que la sectorización sólo afecta al área de cobertura del sector, en el cálculo del número de móviles presentes en el sector se realiza la siguiente corrección:

$$M_T \text{ nuevo} = \frac{M_T \text{ antiguo}}{\text{Grado de Sectorizacion}} \quad (4.6)$$

- N_C : Número medio de móviles que cruzan de un sector a otro.

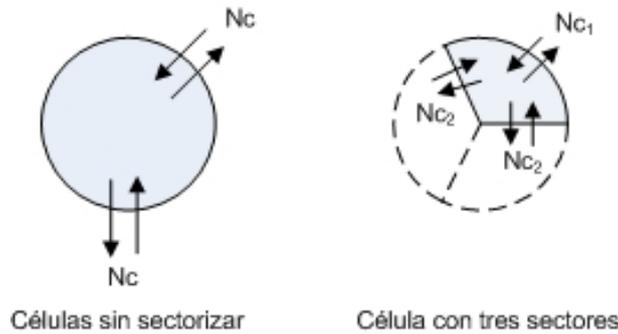


Figura 6: Representación del número de cruces en una célula y en un sector.

Basándonos en la geometría de las células y los sectores, corregimos el número total de cruces en el sector, definido como N_{cT} mediante:

$$N_{cT} = \frac{N_c \cdot (\pi + \text{Grado de sectorizacion})}{\text{Grado de sectorizacion} \cdot \pi} \quad (4.7)$$

³Un proveedor de servicio puede tener mayor interés en una determinada marca o tener una mayor afinidad por un modelo concreto, y esta es la mejor forma de ponderarlo.

⁴Atendiendo exclusivamente al coste unitario se cometería un error, ya que su área de cobertura puede ser inferior al de otras, y necesitar por ello un mayor número de unidades para cubrir el mismo área.

Al realizar la sectorización se hace indispensable añadir nuevo hardware a la BTS. Derivado de ello, la herramienta permite utilizar dos métodos distintos para ampliar el grado de sectorización en una BTS: la 'acumulación de equipos' y la 'compartición del equipo'.

- Acumulación de equipos.

Mediante este procedimiento, además de colocar los paneles de la antena de forma correcta, es necesario instalar hardware adicional en el lugar en el que se encuentra la antena.

- Compartición del equipo.

Este método, por el contrario, considera que al hacer la sectorización se divide la potencia entre los distintos sectores. De esta forma se obtiene un radio celular más reducido, pero se podrá cumplir de mejor forma con el GoS. Sólo serán necesarios un distribuidor y nuevos cables, así como las nuevas antenas, con lo que el coste de este procedimiento es sensiblemente inferior al método de acumulación de equipos. Para garantizar la existencia de, al menos, 8 canales en cada sector, esto es, de al menos un radiocanal, el número de canales de la BTS elegida debe ser igual o superior al número de sectores multiplicado por 8.

En cada uno de los métodos de sectorización se considera un factor de coste (f) para poder plasmar su efecto final sobre el coste de la BTS, tal y como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$C_{total} = C_{BTS} + (n_{sectores}^o - 1)(C_{BTS} \cdot f) \quad (4.8)$$

En el caso de que la sectorización no sea suficiente, se recurre a una de las siguientes posibilidades. Si se está trabajando en una única banda de frecuencias, ya sea 900 MHz o 1800 MHz, se recurre a la reducción del radio celular hasta que se consiga cumplir el GoS. Si por el contrario se trabaja con doble banda (900 MHz y 1800 MHz conjuntamente) se utilizará el dimensionado de células paraguas ⁵ para responder a las pérdidas del sistema primario.

4.4. Reducción del Radio Celular

En este caso se realiza un ciclo iterativo que va reduciendo el valor del radio obtenido hasta conseguir cumplir con el Grado de Servicio. Este proceso se realiza con todas las BTS's disponibles, incluyendo sus posibles grados de sectorización, de manera que se obtienen tanto Estaciones Base omnidireccionales como sectorizadas, con sus correspondientes radios, reducidos hasta cumplir con el GoS requerido.

Las BTS's obtenidas mediante este método tienen un radio celular inferior al que se consigue utilizando su potencia nominal de transmisión. Por ello, tras obtener la BTS definitiva para el despliegue celular en cada zona, es necesario recalcular su nueva potencia de transmisión con el objeto de restringirla, para evitar interferencias en las células vecinas y evitar un mayor coste por uso no útil de energía.

4.5. Células paraguas para el tráfico desbordado

En el caso de trabajar con doble banda de frecuencias y tras efectuar la sectorización, se calcula el despliegue en el área con los datos obtenidos tras la sectorización, considerando la probabilidad de bloqueo obtenida y el tráfico desbordado por cada célula. El porcentaje de tráfico desbordado con respecto al tráfico total que recibe la célula debe ser inferior a un umbral marcado ⁶.

⁵Se denomina célula paraguas a la utilizada para dar servicio al tráfico desbordado de las células principales. Su área de cobertura es mayor, por lo que puede cubrir varias células.

⁶Nótese que dicho umbral no puede ser superior al 50%, ya que de lo contrario, se estaría otorgando a la banda secundaria la condición de banda frecuencial principal.

Seguidamente, se dimensiona el tráfico desbordado de la denominada banda 'primaria' con nuevas Estaciones Base, situadas en el mismo lugar en que se encuentran las BTS's principales ⁷, pero operando en otra banda de frecuencias. El tráfico ofrecido a esta segunda banda, la denominada banda 'secundaria', se calcula a partir de todo el tráfico desbordado en la zona a estudio, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$A_p \text{ total} = A_p \text{ bts primaria} \cdot \text{Numero de Estaciones Base} \quad (4.9)$$

Donde $A_p \text{ bts primaria}$ es el tráfico desbordado de una única Estación Base de la banda primaria. Finalmente, se realiza el despliegue celular de la banda secundaria. Tras calcular el radio celular de una BTS y antes de realizar el estudio del modelo de movilidad, se obtiene el área de dicha célula y con ello se calcula el número de Estaciones Base necesarias para cubrir toda la superficie a estudio. Una vez que se conoce el número de BTS's, se puede obtener el tráfico ofrecido a cada una de ellas:

$$A_o \text{ bts} = \frac{A_p \text{ total}}{n^\circ \text{ BTS's banda secundaria}} \quad (4.10)$$

A partir de este valor se puede realizar el estudio de movilidad y de tráfico. Tras calcular el valor de la probabilidad de bloqueo se debe comprobar si el sistema conjunto, es decir, el formado por la banda primaria y la secundaria conjuntamente, cumple con el Grado de Servicio requerido.

Se considera que el tráfico ofrecido a cada una de las células primarias tiene características de Poisson. Por lo tanto, el tráfico desbordado hacia las células paraguas se define como un proceso de Poisson interrumpido (*IPP*, *Interrupted Poisson Process*). Para calcular los valores del tráfico desbordado del proceso IPP se deben utilizar las fórmulas del modelo de Kosten [10]. Sin embargo, la utilización de este modelo supone que el tráfico ofrecido a las células paraguas proviene única y exclusivamente del desbordamiento, situación que no se adecuaba a nuestro caso. De forma correcta, para el tratamiento del dimensionado, se deberían utilizar modelos de tráfico en dos dimensiones, pero su desarrollo y verificación quedan fuera del alcance de este proyecto. Por lo tanto, se decide tomar como primera aproximación un dimensionado basado en la fórmula de Erlang.

Este método considera todas las Estaciones Base disponibles, con todos los grados de sectorización permitidos. Aún así, pueden darse dos casos en los que no se cumpla con los requerimientos. El primero es que el porcentaje de tráfico desbordado por las BTS's sea superior al permitido, mientras que el segundo es que la probabilidad de bloqueo del sistema completo no cumpla con lo requerido. En ambos casos se recurre a la reducción del radio celular, si bien en el primer caso se procede a la reducción del radio celular de las BTS's de la banda primaria, mientras que en el segundo se realiza la reducción del radio celular de las BTS's de la banda secundaria. El proceso de reducción, así como el cálculo de la nueva potencia de transmisión y del porcentaje de reducción de potencia, se realizan de igual modo que en los casos anteriores.

5. Modelo de la red GSM

El tipo y número de los equipos de red depende en gran manera del despliegue celular. Como normalmente, un único BSC y su correspondiente cluster de BTS's proporcionan cobertura a un área mayor que una ciudad, se deberían realizar cálculos a nivel de una provincia o de una comunidad autónoma para poder obtener resultados precisos. En el caso de estudiar el subsistema NSS, se llegaría a necesitar una configuración a nivel nacional, y con ello, una enorme cantidad de información muy precisa. Por esta razón se utiliza un modelo de proyección, tanto para el subsistema BSS como el NSS, que se basa en el estudio de escenarios típicos.

⁷En el despliegue de la banda secundaria se pretende obtener un número de BTS's considerablemente inferior al número obtenido para la banda primaria. Por lo tanto, no se instalan en cada uno de los lugares ocupados por las BTS's primarias, sino tan sólo en alguno de ellos.

5.1. Modelo de proyección de los BSC's

El modelo de proyección refleja en cada célula de cada tipo definido en el escenario, la contribución del uso de los equipos jerárquicamente superiores a él. Es decir, en este caso concreto, debemos asignar a cada célula la "parte" que usa del BSC al que está asignado. Este modelo se basa en el siguiente concepto: si se considerasen iguales todas las células de una determinada ciudad o municipio, el factor de utilización de un determinado equipo compartido sería la división del número de equipos entre el número de células. Sin embargo, dentro de cada ciudad, las células son diferentes en términos de radio celular, tráfico y tipo de BTS. Para poder reflejar esta circunstancia se considera un modelo de superposición lineal, que se basa en calcular el uso del equipo de red si todas las células fuesen del mismo tipo. Al repetir este cálculo por cada tipo de célula relativa a cada una de las zonas estudiadas se obtiene el factor de uso por cada tipo de Estación Base. Multiplicando por el número de células de cada tipo se obtiene el valor total del factor de uso de ese equipo por cada ciudad tipo.

El modelo considera, para cada tipo de célula, una estructura en forma de cluster genérica y homogénea en donde todas las células conectadas al BSC son del mismo tipo, teniendo por lo tanto, el mismo radio celular y los mismos valores de tráfico. La estructura entre el BSC y los BTS's se define en forma de árbol, en el que debe establecerse el número máximo de saltos, la distancia máxima de cobertura, así como el valor máximo de tráfico capaz de manejar el BSC. Como resultado de este cálculo se obtiene el número medio de BSC's por ciudad.

En consecuencia, el número máximo de células que forman el cluster, se calcula gracias a una limitación en función de cinco parámetros, cuyos valores se proporcionan como datos de entrada. Dichos parámetros son: la capacidad del BSC en Erlangs, el número máximo de BTS's asignables al BSC, la fiabilidad de un único enlace, la fiabilidad total del mayor camino y la distancia máxima de cobertura. Adicionalmente, se debe proporcionar el número de interfaces hacia los BTS's que posee cada BSC así como el coste de cada BSC.

El algoritmo desarrollado se realiza para cada célula individualmente, con sus correspondientes parámetros (radio, tráfico, n° de canales), por lo que finalmente se superponen tantas configuraciones homogéneas como diferentes tipos de BTS's. De esta manera, la realidad de la heterogeneidad en el árbol del BSC se calcula como una combinación lineal de configuraciones homogéneas. Con este método se consigue proyectar la influencia de los diferentes despliegues celulares a la parte superior de la red, sin necesidad de realizar una completa y laboriosa configuración a nivel nacional ⁸.

En el caso de realizar el despliegue celular en dos bandas de frecuencias distintas es probable que se utilicen las denominadas células paraguas ⁹. En esta situación, el desarrollo del modelo de proyección de los BSC's se torna más complicado, ya que estas células, que trabajan en una banda de frecuencias distinta a la de las células del despliegue primario, también cubren toda la zona bajo estudio, y necesitan su correspondiente proyección hacia la red troncal.

La solución a este problema se ha orientado al estudio del tráfico cursado por la banda secundaria. El primer paso es obtener el tráfico al que da servicio una célula paraguas. A partir de este valor se puede obtener el tráfico total al que da servicio la totalidad de este tipo de células, y calcular el tráfico medio correspondiente por cada BTS de la primera banda de frecuencias. Finalmente, se considera únicamente la existencia de las Estaciones Base de la primera banda de frecuencias, con la salvedad de que el tráfico al que da servicio cada BTS se verá incrementado con el valor obtenido en el anterior proceso.

5.2. Modelo de proyección de los MSC's

De forma análoga al modelo de proyección de los BSC's, se consideran clusters de MSC's homogéneos formados por clusters de BSC's homogéneos, es decir, con los mismos tipos de BTS's. El objetivo es calcular el número máximo de BSC's asignados a cada MSC y dicho número viene limitado por la capacidad máxima del MSC en Erlangs y por el número máximo de BSC's asignables a un MSC. Como se dispone del uso del BSC asignable a cada célula, multiplicando este coeficiente por el factor de utilización del MSC obtenido, se consigue calcular el

⁸Búsquedas exhaustivas en la literatura manifiestan que este modelo no se ha aplicado previamente a estudios estratégicos en redes GSM.

⁹Como ya se ha mencionado anteriormente, las células paraguas trabajan en una segunda banda de frecuencias, y dan servicio al tráfico desbordado por las células de la primera banda de frecuencias. En consecuencia, su cobertura es toda la zona a la que dan servicio las Estaciones Base de la primera banda.

factor de utilización del MSC correspondiente a cada BTS (ver figura 7).

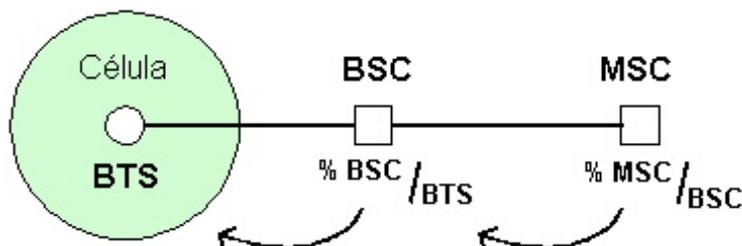


Figura 7: Modelo de cluster jerárquico MSC-BSC-BTS.

A efectos de modelado se considera incluido en el NSS el Subsistema de operación y mantenimiento (*OMS, Operation and Maintance Subsystem*) encargado de las funciones de gestión de red, de la seguridad del acceso a la red y de las comunicaciones para los usuarios y los equipos.

6. Aplicación de *GSM CONNECT* sobre un Caso Práctico

A partir de información obtenida en diversos estudios del Grupo de Ingeniería Telemática de la Universidad de Cantabria se ha representado la ciudad de Santander mediante porcentajes de población y terreno que diferencian las tres zonas detalladas en los modelos, esto es, zona urbano densa, zona suburbana y zona residencial o área abierta. Dichos valores se presentan en la tabla 1.

Parámetros	Superficie	Población
Totales	50.26 Km ²	180717 habitantes
Urbano denso	10 %	50 %
Suburbano	35 %	30 %
Residencial o área abierta	55 %	20 %

Cuadro 1: Representación de la ciudad de Santander.

En referencia al resto de parámetros utilizados en los análisis, es muy importante resaltar que no son valores reales, ya que no se dispone de la información de ningún operador. Los valores utilizados se han obtenido a través de búsquedas en la bibliografía. Las unidades de coste asignadas a los equipos no reflejan los precios de mercado sino que son una orientación que mide el peso relativo de unos equipos respecto a otros. En consecuencia, pese a que se ha plasmado una escala de precios entre los equipos, los resultados relativos a los costes del despliegue y los costes totales proporcionan una referencia relativa más que un valor absoluto. Al tratarse de un resumen del Proyecto Fin de Carrera, nos centraremos directamente en las conclusiones obtenidas en la realización del caso práctico.

Tras realizar una comparativa entre las bandas de 900 y 1800 MHz, se apreció la desventaja existente al realizar el despliegue celular en la banda de 1800 MHz, ya sea en el coste total del despliegue celular, en el coste total de la red o en el coste relativo a cada Erlang de tráfico cursado a nivel celular.

Uno de los parámetros configurables en la metodología de las células paraguas corresponde al porcentaje de tráfico que se puede desbordar como máximo de una Estación Base de la banda primaria. Este valor se obtiene relativo al total del tráfico cursado por una única BTS. Se apreció que los mejores resultados se obtienen para el 15 % de tráfico desbordado, por lo que se toma este valor en los sucesivos análisis.

Las siguientes simulaciones pretendían comprobar la utilidad de realizar el despliegue celular utilizando una doble banda de frecuencias y poder comparar sus características con los despliegues realizados con una única banda

de frecuencias. Se pudo observar que en el análisis con un único tipo de BTS se obtiene un menor coste utilizando el despliegue celular con doble banda y tráfico desbordado que con una única banda. Asimismo proporciona los mejores resultados al utilizar 4 tipos de BTS's distintas con ambos métodos de ordenación, ya sea el coste total de la red al aplicar el método de mínimo coste o el número de Estaciones Base utilizadas al aplicar el método de mínimo número de BTS's. (Ver figura 8). Otro dato a tener en cuenta fue que el coste total obtenido para la doble banda de frecuencias es un 26.06 % inferior al despliegue en 900 MHz y un 42.10 % inferior al despliegue en 1800 MHz. (Ver figura 8).

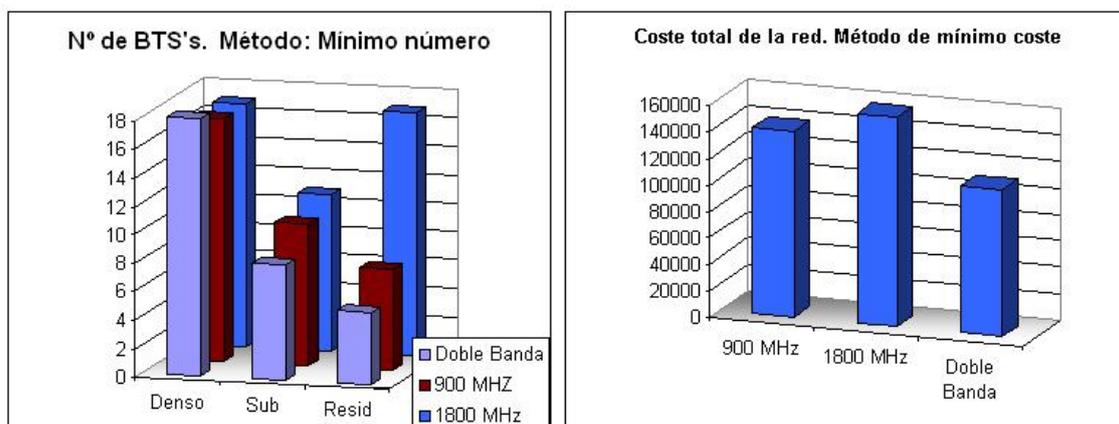


Figura 8: Nº de BTS's con método de mínimo número y coste total de la red con método de mínimo coste. (con 4 tipos de BTS's).

7. Conclusiones

Este Proyecto Fin de Carrera ha sido desarrollado con el objetivo de poder realizar estudios tecno-económicos de la red móvil GSM. Dichos estudios abarcan, en primer lugar, la evaluación de las ventajas correspondientes a la inversión en nueva tecnología y nuevos equipos, y en segundo lugar, la consecución de datos objetivos que ayuden en las confrontaciones entre los operadores móviles y las Autoridades Reguladoras o entre varios operadores. La realización de estos estudios sobre una red nacional completa requiere una inmensa cantidad de información detallada. Además, el estudio de la cobertura y de la capacidad de cada célula supone una enorme tarea debido a las características heterogéneas de la demografía y de la topología de las diversas partes del país. Debido a ello, en este proyecto se utiliza un modelo de proyección basado en un conjunto limitado de escenarios, representados mediante parámetros de superficie y de población. En estos escenarios se utilizan modelos de propagación radioeléctrica, de tráfico y de movilidad para poder obtener las limitaciones que la cobertura y la capacidad imponen sobre el radio de las células del sistema.

En los casos particulares donde, debido a los requerimientos en términos de grado de servicio, sea preciso realizar estudios adicionales, se han utilizado diferentes métodos, como son la sectorización, la reducción celular o la utilización de células paraguas. En este Proyecto Fin de Carrera se han desarrollado los modelos matemáticos y los algoritmos correspondientes para considerar estos métodos en el despliegue celular.

En la realización de este proyecto se ha considerado el estudio de costes incrementales a largo plazo (LRIC) en su modelo Bottom-Up, el cuál está recomendado por diversas directivas de la Comisión Europea. En concreto, este modelo se basa en la demanda de tráfico, en el diseño de red y en los costes unitarios, de tal forma que, partiendo de un diseño de red, se realiza la asignación de coste a cada elemento individualmente.

Se puede concluir que el estudio de este conjunto reducido de escenarios, con sus correspondientes particularidades, proporciona una visión objetiva de la red completa y consigue obtener los costes relativos a los diferentes equipos que la conforman. En consecuencia, este modelo permite el dimensionado de la red sobre una ciudad determinada, y calcular en ella la inversión correspondiente o el coste incremental en cada uno de los equipos utilizados por una llamada.

El conjunto de los modelos y algoritmos desarrollados se han plasmado en una herramienta informática denominada GSM - CONNECT: Cost OriENted Configuration Tool. Y se ha aplicado dicha herramienta a un estudio práctico con el objeto de comparar las diferencias existentes en los despliegues a distintas bandas de frecuencia. En este estudio se ha realizado la optimización de la configuración considerando dos posibles criterios, la maximización de área de cobertura de cada célula, por lo tanto la minimización del número de equipos, y la optimización por mínimo coste, obteniéndose los pertinentes resultados y conclusiones.

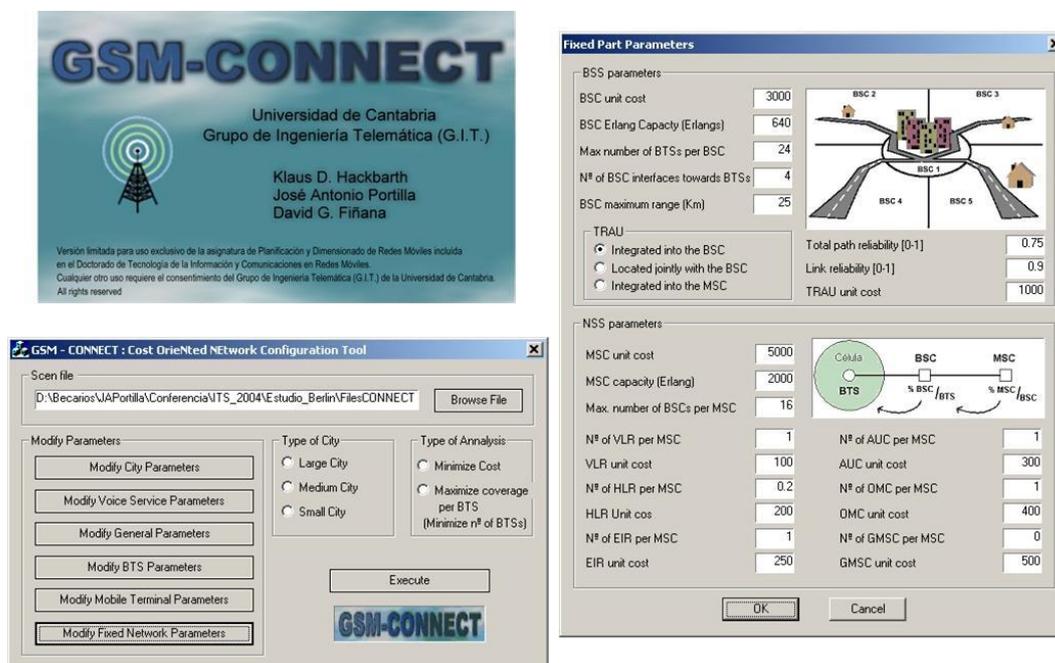


Figura 9: A la izquierda las ventanas principales de la herramienta y a la derecha la ventana de parámetros de red.

Referencias

- [1] Informe Anual sobre el Mercado de las Telecomunicaciones, el Audiovisual e Internet. Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, 25 Julio 2003.
- [2] Recomendación de la Comisión Europea sobre interconexión. Parte 2: contabilidad de costes y separación contable. 8 de abril de 1998. DOCE L 146 13.5.98, pgs. 6-35.
- [3] Comisión Europea, Directivas 90/388/CEE y 96/2/CE, www.europa.eu.int
- [4] C. Courcoubetis, R. Weber, *Pricing Communication Networks : Economics, Technology and Modelling*, Wiley & Sons, Marzo 2003.
- [5] M. Taschdjian, *Pricing and Tariffing of Telecommunication services in Indonesia: Principles and Practice*, Agenica para el desarrollo internacional, www.pegasus.or.id/Reports
- [6] G. Paramés, G. Carrión, M. Ramirez, *Análisis de Costes de Red*, Revista de Telefónica I+D, Num 22, pp.105-122, Sept. 2001.
- [7] Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, *Informe Anual 2000*, Cap IV, pp. 348-360 www.cmt.es
- [8] *Application of long-run incremental costing (LRIC) principles to mobile networks* Analysys expertise and key issues. Analysys, Glasgow.
- [9] D. Hong y S.S.Rappaport. *Traffic Model and Performance Análisis for Cellular Mobile Radio Telephone Systems with Prioritized and Nonprioritized Handoff Procedures*, IEEE Trans. On Vehicular Technology, Agosto 1986.
- [10] L. Kosten. *Stochastic Theory of a Data-Handling Systems with Groups of Multiple Sources*. Proc. Performance of Computer Communications Systems, IFIP, pp. 321-331, (1984).