Mon
621.385
M385
2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DIGITALES Y TELECOMUNICACIONES

Trabajo de Monografía

Implementación en *Matlab*™ de la Técnica de Traspaso IRAT en una Red Móvil con Tecnologías 2G y 3G

Autor: **Br. Pompeyo Abraham Martinez Espinoza, Carnet: 2003-19231**

Tutor: **Ing. Enrique Hernández García**

Managua, Nicaragua

19 de Octubre de 2013

Agradecimiento

Primero dar gracias a Dios, por estar siempre presente y guiarme en las tomas de decisiones, por la salud, la fuerza para seguir adelante y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido apoyo, motivacion y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a mi familia por el esfuerzo realizado por ellos. A mis padres y demás familiares ya que me brindaron todo lo necesario para cumplir este etapa profesional y personal.

Dedicatoria

A mis padres quienes me apoyaron todo el tiempo, en especial a mi Madre que siempre me alentó para continuar mis estudios universitarios. A mi esposa, hermanos, familiares y todas aquellas personas que fueron parte de este camino para cumplir esta meta profesional . Para ellos es esta dedicatoria, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

Pompeyo Abraham Martinez Espinoza

RESUMEN

En este trabajo monográfico se presenta el estudio funcional del proceso de asignación de frecuencias en canales de comunicaciones móviles tipo GSM con tecnologías de tercera generación (3G).

Para ello se ha realizado la caracterización y exposición de las características principales de esta generación haciendo énfasis, dada sus potencialidades y rápido crecimiento e implantación a nivel global, de las tecnologías GSM, CDMA y UMTS.

De igual forma, se ha considerado, que en el diseño de un sistema de comunicaciones celular, la zona de cobertura se divide en celdas, cada una de las cuales está cubierta por una estación base. Cada estación base puede incorporar más de un transmisor y cada transmisor trabaja a una cierta frecuencia en cada instante de tiempo. Además, una misma frecuencia se puede utilizar en diferentes celdas, permitiendo reducir el número total de frecuencias utilizadas (parámetro importante si se considera el elevado precio de la licencia de ocupación del espectro así como sus cuotas anuales).

No obstante, la reutilización de frecuencias en diferentes celdas está limitada por el nivel máximo de interferencias tolerable (7 u 8 dB en el caso de redes GSM). Debemos considerar además que para los servicios de datos esta limitación en la reutilización de frecuencias es un factor crítico si se desean conseguir velocidades de transmisión elevadas. De esta forma, el problema de la asignación de frecuencias consiste en encontrar una planificación que satisfaga unos ciertos requerimientos utilizando el mínimo número de frecuencias o utilizando eficientemente las frecuencias disponibles, teniendo en cuenta las restricciones o limitaciones de la red y tratando de minimizar el nivel de interferencia resultante. Todo esto con el propósito de optimizar la calidad de las comunicaciones de voz y aumentar el ancho de banda disponible para los enlaces de datos.

Para finalizar queremos concluir expresando que en este proyecto final de carrera, se define el Algoritmo RCY para la asignación de frecuencias (el cual está basado en los algoritmos *Hormigas* y *Simulated Annealing*) para redes que utilizan más de una frecuencia en cada transmisor (frequency hopping) con la finalidad de mejorar el comportamiento global del sistema.

INDICE

Objetivos…….....1
Justificación…….……...2
Generalidades……3

Capítulo I. Introducción a los Sistemas 3G…….……10
1. Introducción…….……..10
1.1 Movilidad: desde la Segunda a la Tercera Generación…….……..10
1.2 Diferencias entre WCDMA y la Segunda Generación……11
2. Objetivos de 3G……13
3. Iniciativas Internacionales…….……14
3.1 ETSI…….…….……14
3.2 ANSI……14
3.3 TIA……15
3.4 ITU……15
3.5 3GPP……15
3.6 3GPP2……..18
4. Espectro……...……..19
5. Parte de Radio……..……21
5.1 CDMA……21
5.2 Sumario de los Sistemas Terrestres y Satelitales……..22
6. Terminales……..22
7. Sistemas Celulares (3G)……...23
7.1 IMT- 2000……..23
7.2.1 Multi Carrier Cdma 2000……25

Capítulo II. Planificación de las Redes Celulares……..……....27
Introducción……..27
2.1 Planificación de la Red de Acceso Celular…….……29
2.2 Planificación para Cobertura…….…….…32
2.3 Planificación para Grado de Servicio……46
2.4 Planificación para otros aspectos de calidad de servicio…….…..55

Capítulo III. Estrategias de Adaptación de la Planificación de la Red Celular...66
3.1 Estructura Jerárquica de Celdas en una Red Celular…….……67
3.2 Técnicas para Mejorar la Capacidad de los Sistemas Celulares……...69

Capítulo IV. Asignación de Frecuencias en Telefonía Móvil 3G…..…….....90
Introducción……90
4.1 Sistema GSM……..……..……....90
4.2 Representación de una Red GSM …….…….98

Capítulo V. Coloreado y Multicoloreado de Grafos……...104
Introduccion……...104
5.1 Teoría de Grafos. Definiciones……105
5.2 Multicoloreado de Grafos……...112
5.3 Reutilización de colores en el multicoloreado de grafos…….…119

Capítulo V. Asignación Múltiple de Frecuencias en Redes GSM…….....129
Introducción……..129
6.1 Asignación de frecuencias mediante coloreado de grafos……...129
6.2 Implementación…….131
6.3 Comparaciones…….135

Conclusiones……..142
Bibliografía……...144

Objetivos

Objetivo General

Realizar un estudio sobre los Algoritmos de Control para la Asignación de Frecuencias en Sistemas de Comunicación 3G

Objetivos Específicos

- Realizar una descripción funcional de las redes 3G, especialmente GSM, para conocer los aspectos operativos más relevantes acerca de las características de gestión de su espectro de frecuencias.
- Describir el proceso de diseño de las estaciones bases y la división celular en sectores para una óptima reutilización de las frecuencias disponibles en la red.
- Definir los algoritmos utilizados en los procesos de asignación de frecuencias en redes que utilizan más de una frecuencia por transmisor (frequency hopping).
- Analizar las estrategias más utilizadas en la planificación de una red celular que contribuyen a mejorar la capacidad de dichos sistemas de comunicaciones.
- Describir las técnicas de coloreado y multicoloreado de grafos como técnica de asignación múltiple de frecuencias en redes GSM.

Justificación

La necesidad de los estudiantes por disponer de documentación, actualizada, con un carácter técnico-operativo y no tan académico acerca de la estructuración ingenieril del sistema de comunicaciones móviles más desplegado y exitoso a nivel global como lo es GSM, distinguen a este trabajo.

No es una recopilación, sino más bien un manual basado en el funcionamiento de esta tecnología y el modo en el cual se efectúan los procesos de asignación de frecuencias dentro de sus canales móviles, lo que constituye el punto más crítico en el funcionamiento efectivo de cualquier sistema de comunicaciones de esta naturaleza.

Sin lugar a dudas este trabajo repercutirá en una mejor formación de los usuarios finales del mismo, los estudiantes de cuarto y quinto años de las Carreras de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones a quien está dirigido, de igual forma todos aquellos usuarios que ya han culminado sus estudios de electrónica y deseen disponer de un manual práctico, de referencia, que sea conciso y directo en términos de la operación y especificaciones esta tecnología encontraran en este trabajo información útil y pertinente para sus intereses laborales en el sector de las comunicaciones móviles.

Generalidades

La tercera generación (3G) de tecnología de comunicaciones móviles trae consigo una amplia variedad de servicios. 3G provee acceso a servicios de telecomunicaciones a través de la interoperabilidad de sus redes fijas a todos los usuarios móviles asociados a esta. Los terminales de tercera generación pueden ser interconectados tanto a redes terrestres como satelitales y ellos pueden ser diseñados para usuarios móviles o fijos tanto públicos como privados. Estas facilidades, descritas a modo general, ofrecen alta eficiencia de comunicación con una alta velocidad y calidad, así como un fácil uso o maniobrabilidad de sus interfaces.

Los sistemas 3G pueden ofrecer:

- Alta transmisión confiable simétrica/asimétrica.
- Ancho de banda dinámico (dependiente del tipo de aplicación).
- Altas Velocidades Binarias:
  - ✓ 144 kbit/s en alta movilidad
  - ✓ 384 kbit/s en espacios abiertos
  - ✓ 2 Mbit/s en baja movilidad
- Conmutación de paquetes (IP: Internet Protocol) y conmutación de circuitos (PSTN: Red Pública Telefónica Conmutada).
- Soporte para el acceso IP al internet (navegación web), juegos virtuales, comercio electrónico y audio-video en tiempo real.
- Servicios simultáneos diferentes en una sola conexión.
- Calidad de voz como en la red fija.
- Bandas de frecuencias comunes en cualquier parte del mundo.
- Servicios personalizados, según perfil de usuario.
- Diferentes tipos de servicios en función de la localización del usuario.
- Compatibilidad con sistemas 2G.
- Roaming internacional entre diferentes operadores y diferentes redes.
- Estándar global y abierto que cubre las necesidades de un mercado cada vez más grande.

- El usuario será capaz de recibir el mismo servicio independiente de su localización geográfica. VHE (Virtual Home Environment)
- Cobertura global amplia.
- Conexiones: Multiplexación, QoS negociable, uso eficiente del espectro, seguridad de acceso a la red.
- Standards
- Multiplexación de diferentes servicios con diferentes calidades: demora, tasa de error (desde 10% en el orden de 10^{-6} BER).
- Alta eficiencia espectral y compatibilidad con FDD y TDD.

Planificación de la Red 3G

La planificación de una red celular involucra el análisis de aspectos comerciales, económicos, tecnológicos y operativos. Es importante aclarar que las inversiones que se realizan en los sistemas celulares, al menos para los sistemas desarrollados hasta el momento, presentan una vida útil de entre 5 y 8 años, antes de su obsolescencia tecnológica. La tasa de depreciación de los equipos es muy alta, entonces es importante que todo lo que se instale se utilice para cursar comunicaciones, dado que el operador recibe ingresos básicamente por prestaciones de servicio.

Es una tendencia creciente en muchos mercados que los abonados celulares pasen de la modalidad contractual a una modalidad pre-pagada por medio de tarjetas. En la modalidad prepago el cliente solo paga por las comunicaciones que realiza, no existiendo cargo alguno por el mantenimiento o amortización de la red si el cliente no realiza llamadas. Esto significa que lo que no cursa llamadas no se amortiza, porque cada vez son menos los usuarios dispuestos a pagar por un servicio celular solo por el mero hecho de ser cliente. Por lo tanto la infraestructura debe ser diseñada de modo tal que no se instalen equipos que no se usen.

En este módulo abordaremos los aspectos que conciernen a la red de acceso celular, es decir, a la interfaz entre las MS y las BS. La implementación de las BS es fundamental para dar acceso a los suscriptores de una red celular, a los recursos de la misma.

La red de acceso de un sistema celular está constituida por dos elementos, el espectro radioeléctrico, y la BS que implementa el conjunto transmisor/receptor (o transceptor) de radio de la red celular.

Debido a que las BS deben ser instaladas de forma tal que brinden servicio a los suscriptores en el mayor porcentaje posible del área de servicio de un operador, por su cantidad, y por las condiciones de locación necesarias para su emplazamiento, generalmente constituyen el conjunto de elementos más costoso de la implementación de una red celular. En otros casos el derecho de utilización del espectro radioeléctrico puede constituir el recurso más costoso de la red, como consecuencia de un elevado costo de adquisición de su licencia, resultante de una intensa competencia entre interesados en los procesos de subasta de espectro radioeléctrico realizados por los organismos reguladores. La Tabla 1 muestra, a modo de ejemplo, las tasas pagadas por los operadores a los reguladores de sus respectivos países, para disponer de licencias para brindar servicios de 3G. Estas inversiones en licencias se adicionan a todas las inversiones en equipamiento de red, sistemas de gestión y edificios necesarios para la operativa de la empresa, necesarias aún sin haber comercializado un servicio en el momento de iniciar operaciones.

El diseño de la red de acceso consiste en definir dónde instalar las BS, definir la distribución de antenas a implementar en sus mástiles o torres, y determinar la potencia que emplearán los transmisores de las interfaces de radio.

	Licencias de 3G*					CDMA2000 1x**		Total	
Región	**# de países**	**# de licen -cias**	**Costo de licencias (USD m)**	**# de lanza-mientos en países**	**# de lanza-mientos en opera-dores**	**# de lanzamien -tos en países**	**# de lanzamien -tos en operado-res**	**# de países**	**# de lanza-mientos**
Africa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Americas	1	3	931	-	-	9	20	9	20
Asia	7	23	4'310	1	3	3	5	4	8
Europa	26	83	100'588	3	4	3	3	6	7
Oceania	2	10	673	-	-	2	2	2	2
Total	**36**	**119**	**106'502**	**4**	**7**	**17**	**30**	**21**	**37**

Nota * Donde hubo un proceso formal de asignación de licencias de 3G.
** Lanzado como una extensión de las redes existentes.

Tabla 1: Distribución regional de licencias de 3G e implementaciones a partir del primer año en funcionamiento.

No siempre el objetivo de la planificación de la red de acceso es brindar cobertura en toda el área de servicio, sino en aquellos lugares donde se considera económicamente viable u orientado con los objetivos comerciales del operador.

En resumen, la planificación de la red de acceso, no solo se basa en análisis técnicos del punto de vista de la ingeniería de la red, sino que en ella tienen una importante incidencia aspectos económicos y financieros, por la análisis de rentabilidad de la implementación y estrategia comercial. Este módulo no abordará el análisis de la viabilidad económica de un determinado plan de cobertura, se supondrá que el área considerada para la planificación y diseño reúne las condiciones económicas y comerciales que justifican su implementación.

Los Modelos del Enlace Inalámbrico y Análisis de Modelos de Propagación

En principio la cobertura de la celda depende de los parámetros definidos por el operador, tales como la potencia de transmisión, la altura de la antena, su ganancia, ubicación y directividad. Existen muchos otros parámetros tales como, el ambiente de propagación, colinas, túneles, parques, y edificios, que afectan la cobertura radioeléctrica. Estos parámetros no son modificables por el operador del sistema, varían de acuerdo al lugar y son difíciles de predecir.

En los últimos años han surgido varios modelos de propagación de señales radioeléctricas, dos de los más usados son el resultante de los trabajos de Okumura y Hata, apropiado para zonas urbanas y suburbanas, y que resulta de los trabajos de Walfisch e Ikegami, por ejemplo, apropiado para zonas densamente urbanizadas. Estos modelos de predicción de cobertura se basan en el análisis experimental y estadístico de la propagación de señales radioeléctricas en las bandas empleadas en los sistemas celulares, para diferentes ambientes urbanos y suburbanos.

Interferencia

La interferencia de un enlace radioeléctrico consiste en la afectación del mismo por la existencia de una, o varias, señales originadas por el Hombre en la misma banda utilizada por el enlace. El control de fuentes de emisión radioeléctrica, que realiza generalmente el organismo regulador de las telecomunicaciones en cada país, minimiza la probabilidad de que la interferencia ocurra como resultado de señales emitidas por equipos no pertenecientes al operador, salvo en zonas fronterizas entre
países1, por lo que sí se produce interferencia, generalmente es ocasionada por el mismo operador.

En las redes de acceso celulares se produce, lo que se denomina *reutilización de frecuencias,* debido a que el número de vínculos de comunicación radioeléctricos posible puede ser muy inferior al número de vínculos requeridos por el tráfico en el área de servicio. Esto es similar a lo que ocurre con la asignación de bandas para canales de TV abierta, radios AM y FM comerciales, en un país extenso.

En un mismo país pueden existir dos canales “4” de TV abierta (en la banda de VHF), pero se deben respetar distancias mínimas entre las dos implementaciones del mismo canal. La potencia de transmisión de cada emisora deberá estar cuidadosamente limitada para minimizar la probabilidad de interferencia para todas las diferentes condiciones de propagación atmosférica, muchas dependientes de factores meteorológicos. Los operadores celulares se ven en la necesidad de reutilizar las frecuencias de los canales radioeléctricos para sacar más provecho del espectro radioeléctrico que operan.

En los sistemas celulares se pueden identificar 4 tipos de interferencia:

- Interferencia Co-canal.
- Interferencia de canal adyacente.
- Resultante de Intermodulación.
- Interferencia intersimbólica.

Otros parámetros a considerar en el estudio de los sistemas 3G son:

1. Ruido Radioeléctrico

El ruido es un fenómeno natural que afecta a toda comunicación que emplea el espectro radioeléctrico, y es consecuencia de las virtualmente infinitas fuentes de señales de radio que existen en el Universo. Si se trabaja con señales radioeléctricas con potencias promedio por encima de –105 dBm, el ruido radioeléctrico no constituye un problema, por lo que no se considerará en la planificación y diseño de las redes celulares.

2. Presupuesto del Enlace (Link Budget)

El presupuesto del enlace resulta del conjunto de ecuaciones que relacionan la performance del sistema según sus condiciones de propagación en radiofrecuencia.

En estas ecuaciones se aplican diferentes criterios para cobertura, de modo que se pueda brindar cobertura *outdoor*, *indoor* e *incar*.

La ecuación de presupuesto del enlace calcula la máxima pérdida de potencia que se puede producir en los dos sentidos de propagación, el ascendente, y el descendente, compatible con una comunicación estable entre la MS y la BS.

3. Métodos de Evaluación de la Planificación para Cobertura

Una vez realizada la planificación se puede verificar el diseño por medio de aplicaciones informáticas de predicción de cobertura. Para que los resultados obtenidos por estos programas sean de utilidad es imprescindible que cuenten con información detallada sobre, las características del terreno, edificaciones y disposición de calles. Los resultados son útiles si la predicción de cobertura que realizan se aproxima a la realidad.

4. Planificación para Grado de Servicio

Planificar para grado de servicio consiste, básicamente, en determinar los radios de cobertura de las celdas de modo que se puedan cursar llamadas originadas y terminadas dentro de su área de cobertura, sin una pérdida considerable de llamadas por falta de recursos radioeléctricos (canales) para cursarlas.

5. Patrones de Reutilización de Frecuencias

Considerando que las licencias para los operadores celulares se corresponden con la asignación de una banda limitada del espectro radioeléctrico, que cada tecnología divide esta banda en portadoras de cierto ancho de banda (tal que se pueda asignar un número entero de portadoras a la banda), y que cada portadora implementa un cierto número de canales radioeléctricos para comunicaciones telefónicas; el número total de canales de comunicación disponibles en una banda de telefonía celular es limitado. El número de canales disponibles en una tecnología es, generalmente, muy inferior al número de llamadas que un operador cursa simultáneamente en su red, en la hora de mayor utilización durante el día.

Esto hace necesario establecer un mecanismo que permita reiterar el uso de frecuencias dentro del área de servicio del operador, a esto se le denomina *reutilización de frecuencias*.

Capítulo I

Introducción a los Sistemas 3G

Introducción

I. Movilidad: desde la Segunda a la Tercera Generación

La industria de comunicaciones móvil evolucionó en tres etapas, y en cada nueva etapa o generación fue siendo más confiable y flexible que la anterior.

La Primera Generación (1G) era analógica, esta tenía la capacidad de roaming (servicio de itinerancia) limitada y 1G sólo permitido para llamadas de voz de calidad baja. Al principio, los primeros teléfonos de esta generación fueron diseñados para el uso en vehículos. El sistema AMPS fue el estándar principal (1982-1992) para la primera generación.

La Segunda Generación (2G) de Sistemas la integraron: GSM (ETSI), cdmaOne (ANSI) y TDMA (versión digital de AMPS). Ellos son sistemas digitales con puestos técnicos avanzados para uso del espectro radioeléctrico y con roaming mejorado. Introdujeron un aumento de la capacidad de red, reducción de tarifas y el primer servicio de SMS.

La Generación 2.5 (GPRS), corresponde a mejoras tecnológicas de las redes 2G, con una velocidad de 384 kbit/s. El Tercera Generación de sistemas móviles celular nació con el objetivo de superar las limitaciones de la Segunda Generación.

El concepto de la tercera generación al principio fue FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunication System-ITU), más tarde cambio a IMT-2000 (Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000).

La ITU quiere con la 3ra Generación que la banda de frecuencia sea 2000 MHz, la capacidad del sistema (2000 kbit/s), espectro común en todo el mundo, sistemas terrestres y sistema de satélite, el uso de terminales móviles con acceso a Internet y servicios multimedia.

La 3G maximiza la compatibilidad de las interfaces de radio para ser capaz que funcionen alrededor de diferentes entornos como: vehículos, usuarios móviles, oficinas, etc.

II. Diferencias entre WCDMA y la Segunda Generación

3G está esencialmente basado en la evolución de red de GSM y tecnología UTRA (Acceso de Radio Terrestre Universal), tenemos que pensar de dos modos:

1. Acceso de radio (entre el terminal móvil y la estación base).
2. El Backbone de Red como la columna vertebral (la evolución de la red desde GSM y el acceso de radio desde UTRA).

En la siguiente figura se aprecia este proceso evolutivo de las redes a 3G.

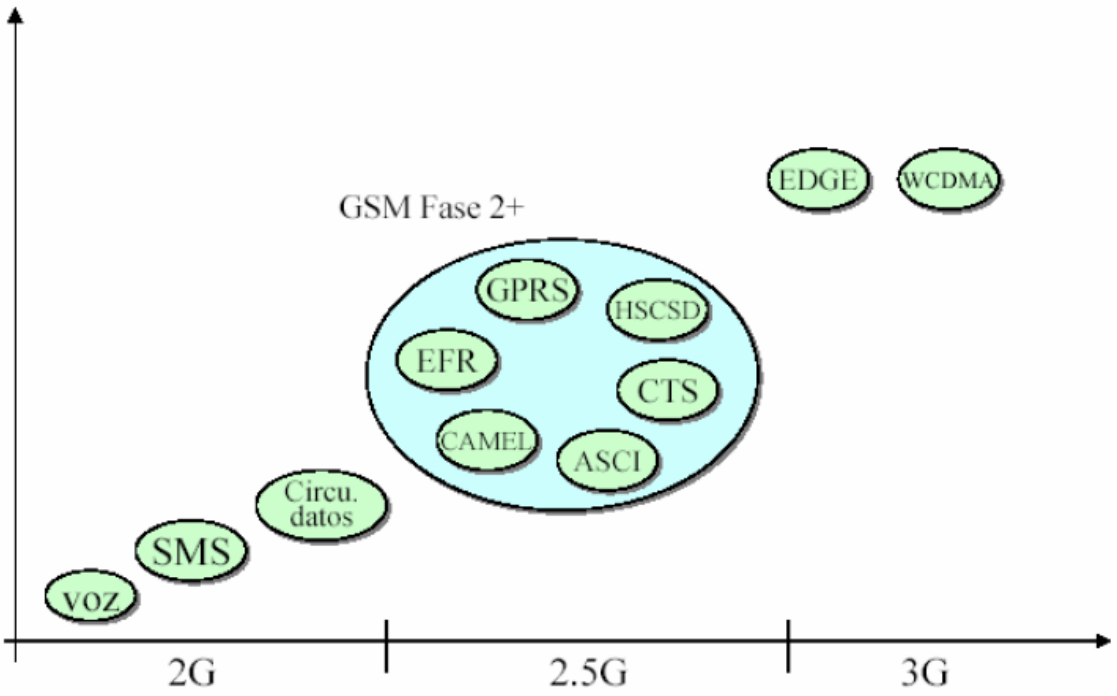


Figura 1: Principales Tecnologías de los Sistemas Móviles de Comunicación

La tercera generación de redes móviles evolucionó de la segunda generación de sistemas como GSM y GPRS.

En GSM, la red principal consiste de dos esferas de servicio CC (conmutación de circuitos) y CP (conmutación de paquetes), en la esfera CC está la Estación Móvil (MS). En la esfera CP esta hay: IMSI.

En la primera Generación existen BS, MSC (centro de conmutación móvil)/VLR (registro de posiciones visitados) y HLR2 (registro de posiciones base).
Las redes de GPRS que introducen dos nuevo corazón conectan a la red nodos SGSN y GGSN.

GPRS BS consiste en Estación Base de tipo Transceiver (BTS) y una Estación Base Controladora (BSC), donde el BSC está conectado al SGSN por medio de un enlace tipo FrameRelay. El BTS se comunica con la MS por un el interfaz de radio Um basado en tecnología TDMA.

UMTS se desarrollo desde GPRS para sustituir la red de acceso de radio. La Red de Acceso de Radio Terrestre (UTRAN) de UMTS consiste en una BS nodo (el término 3G para BTS) y Radio Controladores de Red (RNCs) conectados por una red de ATM.

Los RNC, Nodos BS y MS juntos son llamados la Red de Servicios del Sistema de Radio (SRNS). El Equipo de Usuario (UE; el término 3G para MS) conectado con la BS Nodo es por medio de una interfaz de radio Uu basada en tecnología WCDMA (CDMA de banda ancha).

Cada RNC está relacionado con SGSN por el interfaz IuPS, y con un MSC por un interfaz IuCS. Un RNC puede conectarse a varios RNCs por medio de un interfaz Iur. El IuCS, IuPS, Iub, y los interfaces Iur son implementados en la Red ATM.

El núcleo de la red dispone de otros nodos tales como HLR, VLR, GGSN desarrollados en la primera generación pero el SGSN y la MS tienen una modificación desde la 1G a GPRS y UMTS.

En GPRS, la comunicación confiable entre MS y SGSN es garantizado por LLC. En UMTS, el protocolo de Control de Recurso de Radio (RRC) es responsable de la unión confiable entre UTRAN y SGSN. Específicamente, los recursos de radio son controlados por RRC para la comunicación entre MS y el UTRAN.

1.1 Objetivos de 3G

Los sistemas 3G pueden ofrecer:

- Alta transmisión confiable simétrica/asimétrica.
- Ancho de banda dinámico (dependiente del tipo de aplicación).
- Altas Velocidades Binarias:
  - ✓ 144 kbit/s en alta movilidad
  - ✓ 384 kbit/s en espacios abiertos
  - ✓ 2 Mbit/s en baja movilidad
- Conmutación de paquetes (IP: Internet Protocol) y conmutación de circuitos (PSTN: Red Pública Telefónica Conmutada).
- Soporte para el acceso IP al internet (navegación web), juegos virtuales, comercio electrónico y audio-video en tiempo real.
- Servicios simultáneos diferentes en una sola conexión.
- Calidad de voz como en la red fija.
- Bandas de frecuencias comunes en cualquier parte del mundo.
- Servicios personalizados, según perfil de usuario.
- Diferentes tipos de servicios en función de la localización del usuario.
- Compatibilidad con sistemas 2G.
- Roaming internacional entre diferentes operadores y diferentes redes.
- Estándar global y abierto que cubre las necesidades de un mercado cada vez más grande.
- El usuario será capaz de recibir el mismo servicio independiente de su localización geográfica. VHE (Virtual Home Environment)
- Cobertura global amplia.
- Conexiones: Multiplexación, QoS negociable, uso eficiente del espectro, seguridad de acceso a la red.
- Standards
- Multiplexación de diferentes servicios con diferentes calidades: demora, tasa de error (desde 10% en el orden de 10^{-6} BER).
- Alta eficiencia espectral y compatibilidad con FDD y TDD.

1.2 Iniciativas Internacionales

El Tercer Proyecto de Sociedad para la 3ra Generación (3GPP) es un acuerdo de colaboración en tecnología de telefonía móvil, que fue establecido en diciembre de 1998. Esta cooperación es entre ETSI (Europa), ARIB/TTC (Japón), CCSA (China), ATIS (América del Norte) y TTA (Corea del Sur). El ETSI es el organismo europeo de estándares, ANSI es el organismo de estándares de los Estados Unidos y Canadá y todos los organismos que están en todas las partes en el mundo. Todas estas organizaciones se han unido para hacer una solo especificación de carácter global para este tipo de tecnología. Estas son todas las entidades asociadas al respecto: ETSI, ANSI, T1, CWTS, ARIB/TTC y TTA las que pertenecen al llamado 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*)

1.2.1 ETSI (The European Telecommunications Standards Institute)

Es una organización independiente cuya misión es producir estándares de telecomunicaciones para hoy y para el futuro. El ETSI es oficialmente responsable de la estandarización de Telecomunicaciones, transporte inteligente y redes médicas electrónicas (también, la radiodifusión y áreas relacionadas).

ETSI hace muchos estándares y documentación técnica como aporte a todo el mundo en materia de estandarización de ICT (Information and Communication Technology). Esta actividad es complementada por la interoperabilidad, las pruebas de servicios y otras especialidades.

1.2.2 ANSI

Es una organización que tiene la misión de administrar y coordinar el sector de estandarización privado de los Estados Unidos.

ANSI facilita el desarrollo de Estándares Nacionales Americanos (ANS). Éstos lo realizan a través de grupos que trabajan cooperativamente para hacer estándares nacionales.

ANSI, es un instituto privado y la misión crear tanto un espíritu global competitivo de negocios estadounidense y mejorar la calidad de vida estadounidense promovido mediante la facilitación de estándares (salvaguardando su integridad).

1.2.3 TIA (Telecommunications Industry Association)

Asociación de la Industria de Telecomunicaciones de los Estados Unidos encargada de desarrollar todo un cuerpo de estándares para esta industria.

1.2.4 ITU (International Telecommunication Union)

Organización Internacional de Telecomunicaciones (UIT) creada en 1865, hizo el primer estándar internacional para telégrafo conecta a la red.

La ITU ha trabajado infatigablemente para asegurar que los últimos avances tecnológicos han sido rápidamente integrados en las redes de telecomunicación de países alrededor del mundo.

Con un ingreso que incluye a casi todos los países del mundo y más de 500 miembros privados de la telecomunicación, transmitiendo e informando a sectores de tecnología, ITU puede gestionar nuestros recursos de telecomunicación. Esta organización internacional es uno de los miembros de la comunidad 3GPP, ITU usa una perspectiva imparcial de carácter global con la ayuda de cientos de fabricantes principales, portadores y abastecedores de servicio.

1.2.*5 3GPP (3rd Generation Partnership Project)*

Todas las organizaciones de internacionales se han unido estableciendo un acuerdo con especificaciones técnicas para aplicarlos globalmente. La idea no es tener una especificación diferente para la tercera generación en cada parte del mundo, 3GPP quiera por un trabajo de grupo que cree una lista de especificaciones con el concurso de todos sus miembros.

Para hacer un estándar bueno 3GPP tiene que conseguir las exigencias del mercado, porque si una organización creara un equipo y luego nadie lo compra o los servicios son desarrollados y nadie los usa, es una actividad que no sirve, esto es algo que 3GPP ha evitado. 3GPP tiene la asociación de GSM, IP, V6 (la Versión 6 de Protocolo de Internet) y UWCC3.

1.2.*5.1 Grupo de Trabajo*

3GPP tiene dos divisiones básicas: el grupo de proyectos, que dirige el trabajo, y el más importante el grupo de especificaciones de ingeniería. Ellos son grupos que trabajan en el aspecto técnico y escriben las especificaciones. Todas las compañías mundiales

decidieron ser parte de 3GPP; ellos son los miembros individuales y sus resultados son tomados según los procesos de UIT. Toda la información reguladora va a los miembros, tan pronto pasa por el grupo de especificaciones de ingeniería de 3GPP (las especificaciones son generadas por 3GPP), finalmente pasan a los organismos de estándares y siguiendo los procesos de UIT.

Este grupo sólo trabaja de modo electrónico, usando el correo electrónico y no hay nada en papel, sólo discos duros, CD-ROM, etc. Los resultados están en un sitio Web y disponible a los miembros.

En una reunión típica de 3GPP, pueden generarse 10,000 páginas de documentación.

El centro de cómputo es un grupo de 27 personas dedicadas a tiempo completo, altamente capacitadas y trabajan en el sitio de ETSI en Sophia Antipolis (Francia).

Los tipos de de 3GPP son:

"*Organizational Partners*"

Organismos de estandarización regional con capacidad de proveer normas:

ETSI (Europe)

T1 (EEUU)

CWTS (China)

TTA (Korea), ARIB

TTC (Japan).

"*Los miembros individuales*"

Las empresas que pertenecen a los socios de las organizaciones anteriores pueden participar directamente en el 3GPP. Ellos hacen las contribuciones técnicas. Estos miembros individuales pueden contribuir a la UIT, pero las normas tienen que aprobarse por los organismos de normalización regionales.

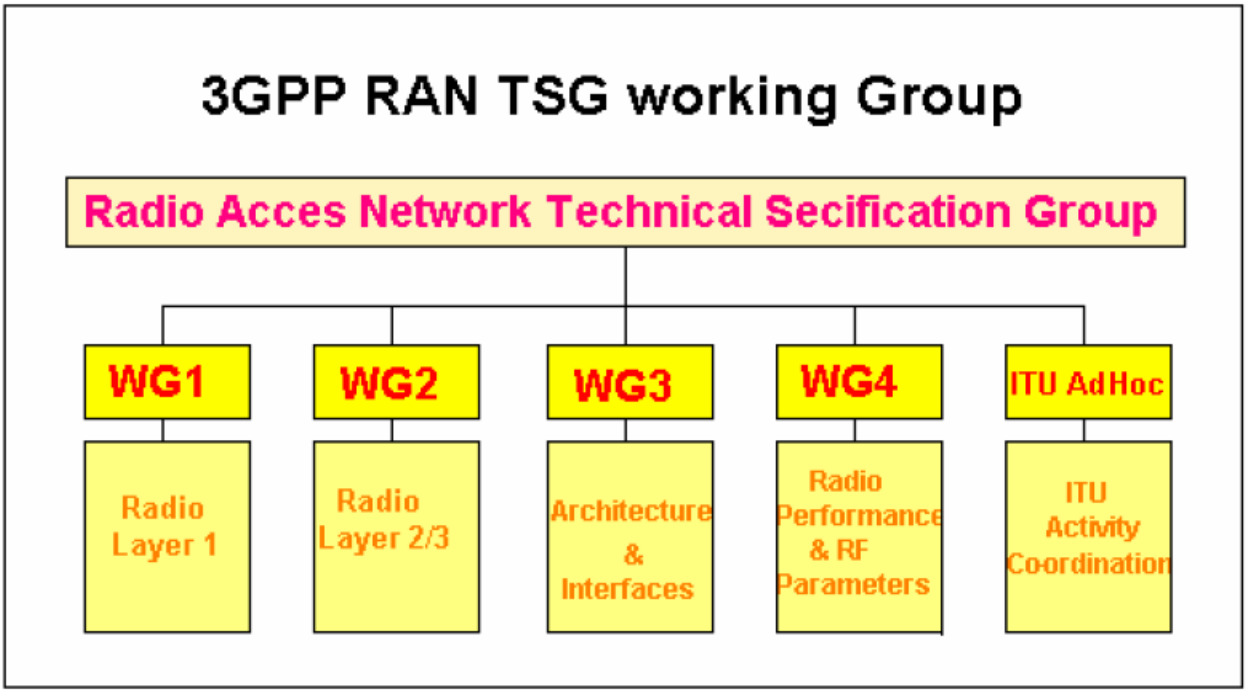
"*Representantes del Mercado*"

Son proveedores mundiales de Mobile Association (GSA), GSM Association, Foro UMTS, Universal Wireless Communications Consortium (Consorcio UWC), IPv6 Forum, Mobile Wireless Internet Forum (MWIF) y 3G.IP. Empresas tales como los fabricantes y los operadores son miembros de 3GPP a través de la organización de normalización respectivos.

"Observadores"

Son TIA (Asociación de la Industria de Telecomunicaciones), TSACC (Estándares de Telecomunicaciones Consejo Consultivo de Canadá) y ACIF (Foro de Industria de Comunicaciones Australiano).

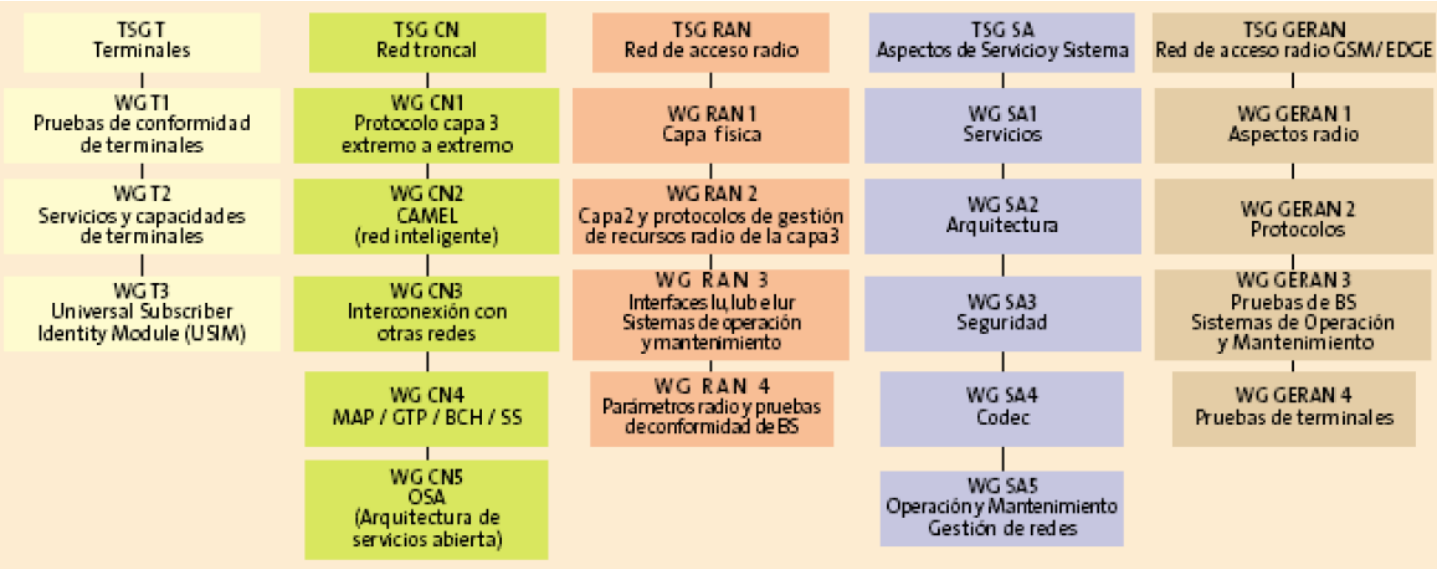
La estructuración del 3GPP está en cinco TSGs (Grupos de Especificación Técnicos), cada uno de ellos con varios grupos de trabajo WGs (Trabajando Grupos).



En este momento 3GPP usa un PCG (Grupo de Coordinación de Proyecto) y hay 4 grupos tecnológicos (TSGs):

- El acceso de radio (TSG CORRIÓ - Red de Acceso de Radio-).
- La red (TSG CN - Red Principal-).
- Los terminales (TSG T - Terminales-).

- Los servicios y los aspectos del sistema. (TSG SA - Servicio y aspectos de Sistema).

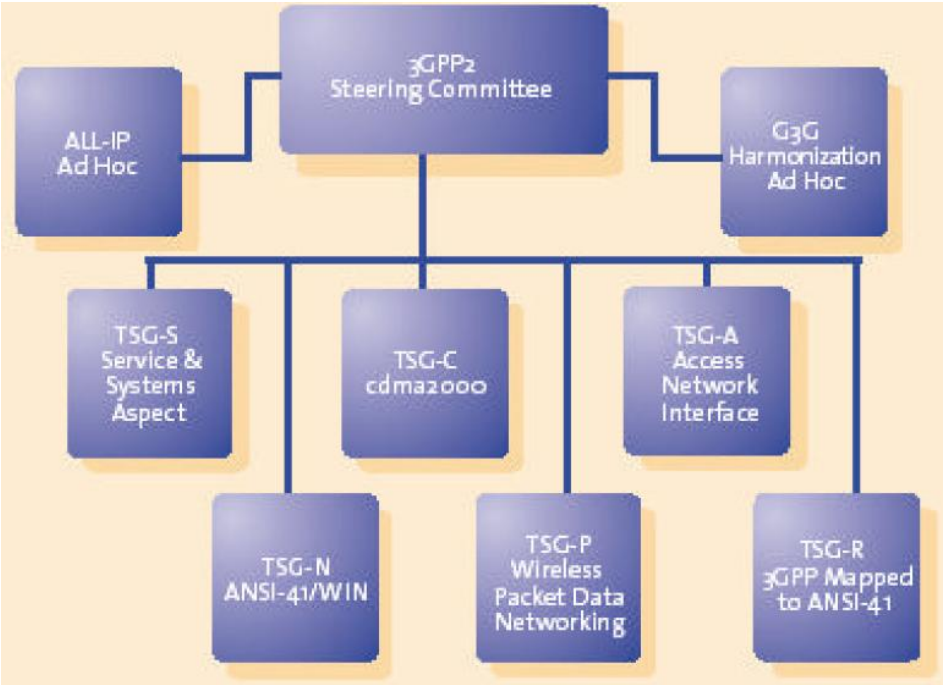


1.2.*6 3GPP2*

Al principio el ETSI propuso el concepto de 3GPP como una organización global, este foro pronto anunció su interés por la investigación en GSM. Por consiguiente, ANSI propuso la creación del 3GPP2 para promover la estandarización de redes principales basadas en ANSI-41 y su RTTs.

Básicamente la idea era desarrollarse al estándar cdma2000 como la evolución de Is-95, hay implantación grande en los Estados Unidos y América Latina.

El 3GPP2 comienza en enero de 1999 en Vancouver (Canadá). En el 3GPP2 TIA son representados (el U.S.A.), ARIB y TTC (Japón), TTA (Corea) y CWTS (Chino).
La estructura de 3GPP2 es mediante un comité de dirección (Conduciendo el Comité, Consejero principal) y grupos de especificaciones de ingeniería TSG (Especificación Técnica Grupos). Cada TSG tiene diversos grupos de trabajo (como 3GGP).



TSG-A (Interfaces de Red de Acceso)

La especificación de interfaces responsable entre la Red de Acceso de Radio (RAN) y la Red Principal.

TSG-C (cdma2000)

Responsable del (incluso la estructura interna) sistemas basado en especificaciones del 3GPP2.

TSG-P (Gestión de redes de Datos de Paquete Inalámbrica)

Responsable de las especificaciones de la parte del sistema de red de paquetes basado en especificaciones 3GPP2.

TSG-R (3GPP Trazado un mapa a ANSI-41)

Responsable de interoperabilidad entre las tecnologías de radio en el 3GPP y la red principal desarrollada por ANSI-41.

TSG-S (Servicio y Aspectos de Sistemas)

Este desarrolla exigencias de capacidades para sistemas basados en especificaciones 3GPP2.

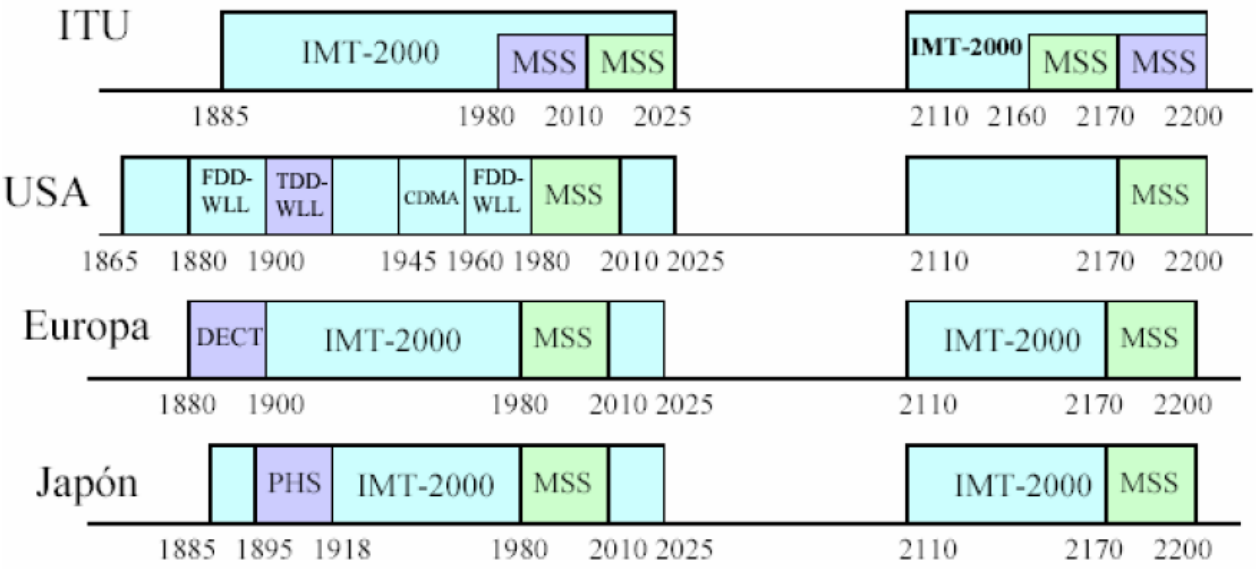
TSG-N (ANSI-41/WIN)

Responsable de las especificaciones de red principal en sistemas basados en especificaciones 3GPP2.

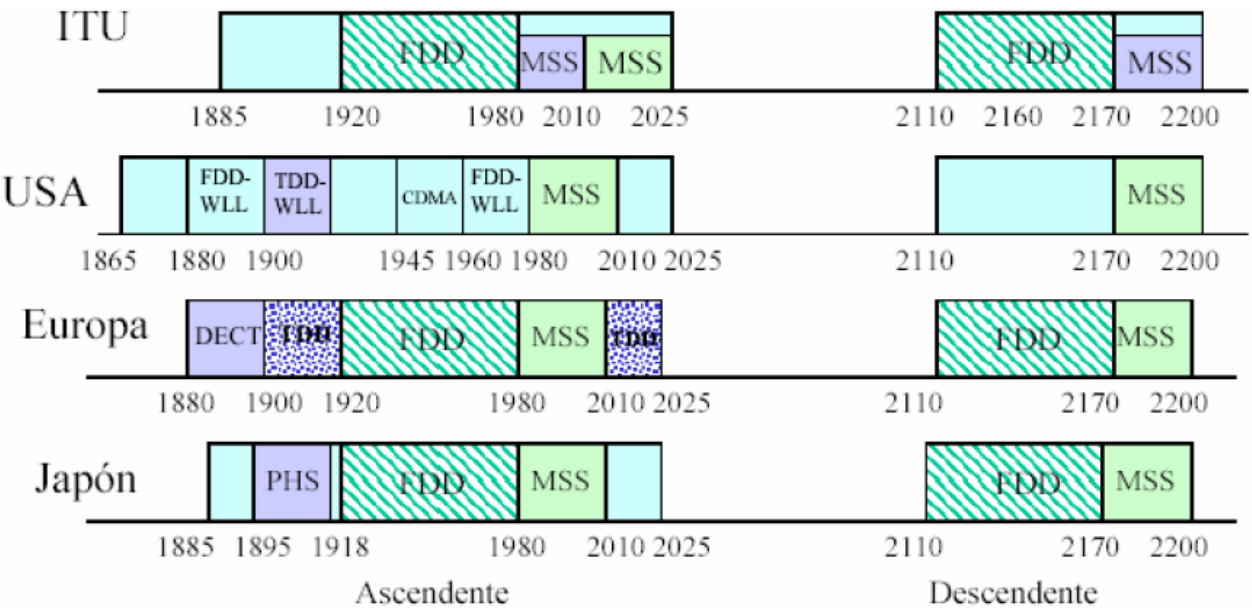
1.3 Espectro

Al principio fue recomendado reservar 230 MHz para el espectro IMT-2000 con Las bandas de 1885-2025 MHz y 2110-2200 MHz, que incluyen 1980-2010 MHz y 2170-2200 MHz para la componente de satélite. Esta banda es usada para los sistemas de tercera generación en Europa. En América todas estas bandas están utilizadas por los sistemas de la segunda generación y en la gran parte de China el espectro para 3G está dedicado a aplicaciones WLL (Lazo Inalámbrico Local). Esto ha causado el objetivo principal de 3G, sea reservar una sola banda en cualquier parte del mundo, esto no se ha alcanzado totalmente. Después, una banda adicional fue aceptada, es decir, 160 MHz más. Ellos incluyen las bandas de los sistemas de la segunda generación presentes, razón suficiente para que los operadores de 2G pudieran emigrar a 3G en sus mismas bandas. Este cambio sería ventajoso por la posibilidad de dar más servicios avanzados, por la mayor eficacia espectral y la admisión de más usuarios.

Espectro disponible es:



Espectro Elegido



1.4 Parte de Radio

1.4.1 CDMA

Es una tecnología celular digital que usa técnicas de espectro disperso. A diferencia de los sistemas, como el GSM, que uso TDMA, CDMA no adjudica una frecuencia específica a cada usuario.

En cambio, cada canal usa el espectro disponible. Las conversaciones de los usuarios son codificadas con una secuencia digital pseudoaleatoria.

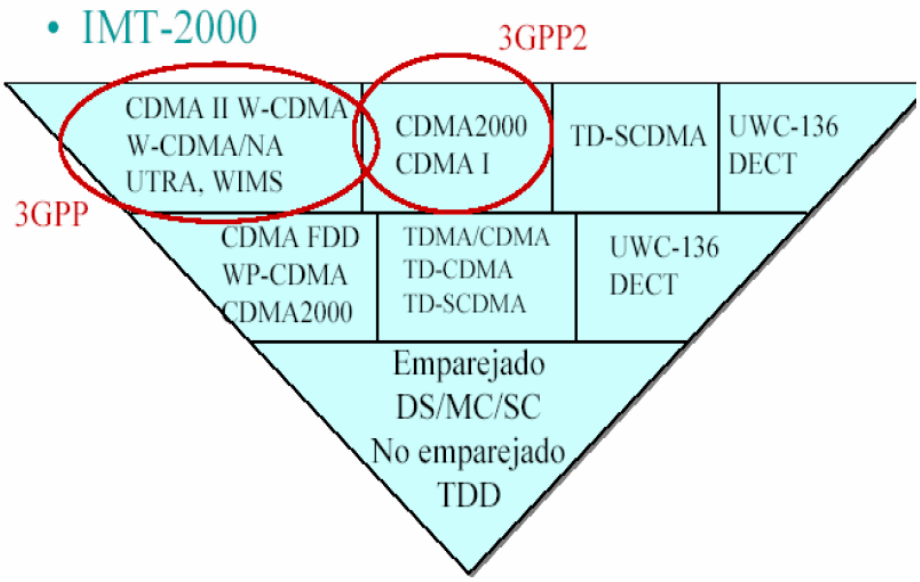
Los recursos mundiales están siendo dedicados a la tecnología CDMA de la tercera generación, incluso Multiportador (cdma2000 1xMC y HDR con un ancho de banda de 1.25 MHz), y Dispersión Directa (WCDMA con ancho de banda de 5 MHz).

CDMA fue adoptado por la Asociación de la Industria de Telecomunicaciones (TIA) en 1993. En septiembre de 1998, sólo tres años después de la primera implantación había 16 millones de suscriptores en sistemas cdmaOne por todo el mundo. Hacia mayo de 2001 había 35 millones de suscriptores en cdmaOne, los sistemas por todo el mundo suman ahora 60 millones.

CDMA de banda ancha que forma la base de redes UMTS 3G, fue desarrollada al principio por Qualcomm, CDMA es caracterizado por su alta capacidad y pequeño radio

de celda, empleando tecnología de espectro disperso y un esquema de codificación especial.

Sumario de tecnologías basadas en CDMA y su interrelación,



5.2 Sumario de los Sistemas Terrestres y Satelitales

Sistemas Terrestres

• DECT	✍ETSI DECT
• UWC-136	✍USA TIA TR45.3
• WIMS W-CDMA	✍USA TIA TR46.1
• TD-SCDMA	✍China
• W-CDMA	✍Japon
• CDMA-II	✍Korea
• UTRA	✍ETSI SMG2
• NA W-CDMA	✍USA T1P1-ATIS
• cdma2000	✍USA TIA TR45.5
• CDMA-I	✍Korea

Sistemas Satelitales

• SAT-CDMA	✍Korea
• SW-CDMA	✍ESA
• SW-CTDMA	✍ESA
• ICO-RTT ICO	✍Global Communication
• Horizons	✍Inmarsat
• INX	✍Iridium

1.5 Terminales

Uno de los objetivos de 3G es permitir que el usuario se comunique en cualquier lugar y en cualquier momento, si es posible, es necesario que los terminales tengan las capacidades y las características que la segunda generación móvil no tiene.

Ahora los terminales 3G no son sólo teléfonos móviles, porque ellos permiten enviar y recibir diferentes tipos. Los terminales tienen que seguir el estándar porque el terminal 3G tiene que comunicarse con terminales de otros operadores, con terminales de otras señales, y con las otras redes.

1.6 Sistemas Celulares 3G

El concepto de sistema de tercera generación al principio se denominó en el ITU con el nombre de FPLMTS (Sistema de Telecomunicación Público Móvil Futuro en Tierra), más tarde se cambio a IMT-2000. El IMT-2000 evoca la idea de la tercera generación que tenía la ITU cuando definió sus exigencias: la banda de frecuencia (2000 MHz), la capacidad del sistema (2000 kbit/s) y el año en el cual las especificaciones de radio tendrían que estar listas.

El resultado de los trabajos de ITU, dentro de sus recomendaciones y en los documentos de carácter general delimitan las características que deben tener los sistemas de tercera generación. El más interesante es el M 1457, porque ello tiene un resumen de las interfaces radioeléctricas de los sistemas IMT-2000.

1.6.1 IMT- 2000

Hay diez ofertas para los sistemas de la tercera generación: dos europeo, cuatro de U.S.A, dos de Corea, uno de Japón y uno de China.

Sólo en dos de las propuestas (el americano Uwc-136 y DECT europeo) se ha utilizado TDMA. El método elegido para las demás propuestas era el DS-CDMA (Espectro Disperso Directo CDMA). Hay tres tipos de propuestas y depende de la velocidad de procesador, operación síncrona/asíncrona de la estación de base y el camino de transmisión de las secuencias. Estos tres grupos son:

1. UMTS - UTRA (Europa-ETSI), W-cdma (Japón-ARIB), WCDMA/NA (el U.S.A. T1P1), CDMA II (Corea TTA) y Wims-wcdma (el U.S.A.-TIA TR46.1).

2. Cdma2000 (EE UU-TIA TR45.5) y CDMA yo (Corea-TTA).

3. TD-SCDMA (China-CATT).

Después ITU tiene que decidir cuál de las tres propuestas cumple satisfactoriamente con las exigencias de 3G. A consecuencia de esta presentación, algunas de estas propuestas se unificaron en una convergencia de sociedades de proyectos. El objetivo de estos proyectos de sociedad consistían en que las diferentes organizaciones de normalización de las distintas regiones mundiales podrían colaborar juntos.

Entonces estos proyectos de sociedad crearon el:

1. 3GPP (Tercer Proyecto de Sociedad de Generación) para armonizar el Ofertas europeas y asiáticas.

2. El 3GPP2 (Tercer Proyecto de Sociedad de Generación 2) para armonizar las ofertas americanas y cunas coreanas en cdma2000.

Al final de mayo de 1999 parece G3G (primera versión de la Tercera Generación Global CDMA). El objetivo de esta organización era armonizar los parámetros de radio, en el mismo tiempo, para permitir la unión de los sistemas con la red europea principal GSM MAP y la red principal americana de la ANSI-41. En consecuencia, G3G reconoció estas interfaces de radio:

✍FDD DS (Direct Spread), basado en una propuesta de UTRA W-cdma del 3GPP.

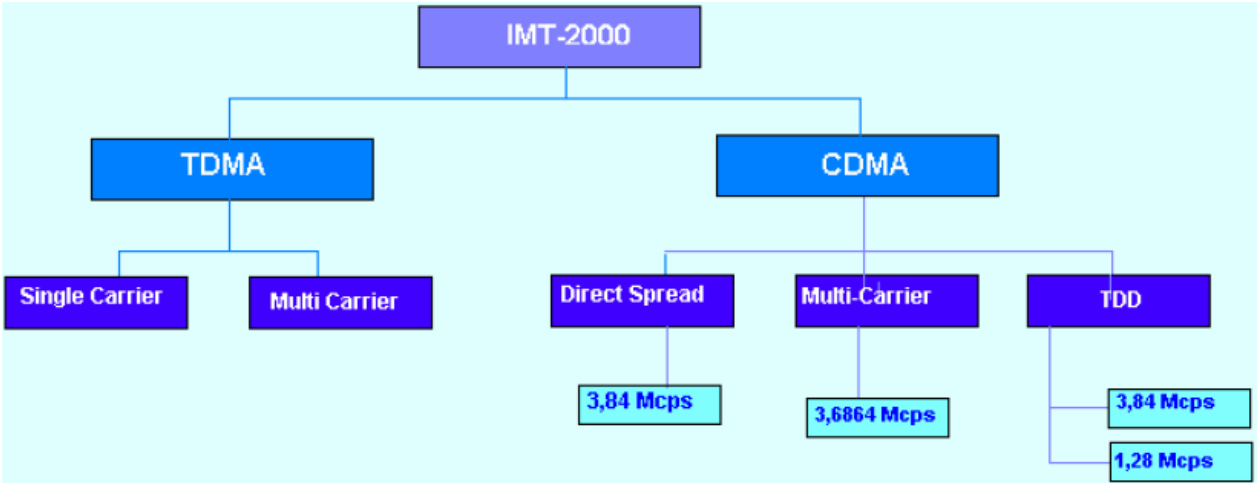
✍FDD MC (Multi Carrier), basado en la propuesta de Cdma2000 del 3GPP2.

✍TDD, System UTRA TD/CDMA de ETSI, en sintonía con el estándar chino Td-scdma.

En un modo más explicito:

Nombre ITU	Conocido como:	Organismo de estandarización
IMT-2000 CDMA Direct Spread (DS)	UMTS-FDD UMTS W-CDMA	3GPP
IMT-2000 CDMA Multi-Carrier (MC)	cdma 2000	3GPP2
IMT-2000 CDMA TDD	UMTS-TDD UMTS	3GPP
IMT-2000 TDMA Single-Carrier	UWC-136	UWCC
IMT-2000 FDMA/TDMA	DECT	ETSI

O bien,



Por lo tanto, en la reunión de Helsinki del 25 de octubre hasta el 5 de noviembre de 1999 ITU-R aprobado la familia de sistemas IMT-2000.

Uno de los objetivos de IMT-2000 era que un móvil 2G pudiese comunicarse con uno 3G; Esto es más fácil si 3G mantiene la misma trama (200 KHz) y la misma trama de control. GSM e IMT2000 usan el mismo tipo de estructura de multitrama (120ms).

1.6.2 Multi Carrier Cdma 2000

Cdma2000 es la solución de 3ra Generación basada en Is-95. El interfaz de red definida para Cdma2000 apoya la red de segunda generación de todos los operadores presentes, independientemente de la tecnología (cdmaOne, Is 136 TDMA o GSM).

El TIA presentó esta norma a UIT como una parte del proceso de IMT2000. Cdma 2000 funciona en modo TDD y/o vía FDD, cdma2000 ofrece velocidades de 1.2 kbit/s a 2 Mbit/s.

El Cdma2000 además, añade una banda de guarda de interferencia de 640 kHz por cada lado del espectro para protección contra interferencia en canales adyacentes (interferencia co-canal). Cdma2000 funciona en sincronismo entre el móvil y la BS.
CDMA2000 es una solución para operadores de nuevas redes de radio y con el deseo de tomar ventaja de los dinámicos cambios del mercado de consumidores creado por la movilidad y el Internet. CDMA2000 es tanto una interfaz de aire como una solución de red que proporciona los servicios que los clientes exigen hoy en día.
El objetivo de este grupo de normalización es proporcionar itinerancia global (roaming) entre las diferentes modalidades de 3G: CDMA 3G, CDMA2000 y WCDMA.

Capítulo II

Planificación de las Redes Celulares

Este capítulo se complementa con siguiente para crear un marco de conocimiento que permita entender, por una parte, cómo se planifica y diseña una red de acceso para la implementación de una red de servicios celulares; y tras su implementación, cómo se puede seguir desarrollando de forma armónica para responder a requerimientos crecientes de capacidades de cobertura y tráfico.

La planificación de una red celular involucra el análisis de aspectos comerciales, económicos, tecnológicos y operativos. Es importante aclarar que las inversiones que se realizan en los sistemas celulares, al menos para los sistemas desarrollados hasta el momento, presentan una vida útil de entre 5 y 8 años, antes de su obsolescencia tecnológica. La tasa de depreciación de los equipos es muy alta, entonces es importante que todo lo que se instale se utilice para cursar comunicaciones, dado que el operador recibe ingresos básicamente por prestaciones de servicio.

Es una tendencia creciente en muchos mercados que los abonados celulares pasen de la modalidad contractual a una modalidad pre-pagada por medio de tarjetas. En la modalidad prepago el cliente solo paga por las comunicaciones que realiza, no existiendo cargo alguno por el mantenimiento o amortización de la red si el cliente no realiza llamadas. Esto significa que lo que no cursa llamadas no se amortiza, porque cada vez son menos los usuarios dispuestos a pagar por un servicio celular solo por el mero hecho de ser cliente. Por lo tanto la infraestructura debe ser diseñada de modo tal que no se instalen equipos que no se usen.

En este módulo abordaremos los aspectos que conciernen a la red de acceso celular, es decir, a la interfaz entre las MS y las BS. La implementación de las BS es fundamental para dar acceso a los suscriptores de una red celular y a los recursos de la misma. La red de acceso de un sistema celular está constituida por dos elementos, el espectro radioeléctrico, y la BS que implementa el conjunto transmisor/receptor (o transceptor) de radio de la red celular.

Debido a que las BS deben ser instaladas de forma tal que brinden servicio a los suscriptores en el mayor porcentaje posible del área de servicio de un operador, por su cantidad, y por las condiciones de locación necesarias para su emplazamiento,

generalmente constituyen el conjunto de elementos más costoso de la implementación de una red celular. En otros casos el derecho de utilización del espectro radioeléctrico puede constituir el recurso más costoso de la red, como consecuencia de un elevado costo de adquisición de su licencia, resultante de una intensa competencia entre interesados en los procesos de subasta de espectro radioeléctrico realizados por los organismos reguladores. La Tabla 1 muestra, a modo de ejemplo, las tasas pagadas por los operadores a los reguladores de sus respectivos países, para disponer de licencias para brindar servicios de 3G. Estas inversiones en licencias se adicionan a todas las inversiones en equipamiento de red, sistemas de gestión y edificios necesarios para la operativa de la empresa, necesarias aún sin haber comercializado un servicio en el momento de iniciar operaciones.

	Licencias de 3G*					CDMA2000 1x**		Total	
Región	# de países	# de licen -cias	Costo de licencias (USD m)	# de lanza- mientos en países	# de lanza- mientos en opera- dores	# de lanzamien -tos en países	# de lanzamien -tos en operado - res	# de países	# de lanza- mientos
Africa	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Americas	1	3	931	-	-	9	20	9	20
Asia	7	23	4'310	1	3	3	5	4	8
Europa	26	83	100'588	3	4	3	3	6	7
Oceania	2	10	673	-	-	2	2	2	2
Total	**36**	**119**	**106'502**	**4**	**7**	**17**	**30**	**21**	**37**

Nota * Donde hubo un proceso formal de asignación de licencias de 3G.
** Lanzado como una extensión de las redes existentes.

Tabla 2.1: Distribución regional de licencias de 3G e implementaciones a partir del primer año en funcionamiento.

El diseño de la red de acceso consiste en definir dónde instalar las BS, definir la distribución de antenas a implementar en sus mástiles o torres, y determinar la potencia que emplearán los transmisores de las interfaces de radio.

Al planificar la red de acceso se deben tomar en cuenta aspectos comerciales, tales como brindar cobertura en sitios donde el tráfico puede ser bajo pero resulta imprescindible para los usuarios ante una eventualidad tener cobertura. Tal es el caso de las carreteras y autopistas, donde el tráfico puede ser escaso, pero es necesario dar

cobertura en la mayor parte posible del trayecto, atendiendo a la eventualidad que un usuario en caso de accidente o desperfecto mecánico pueda comunicarse.
Posiblemente el tráfico que se facture como cursado por radiobases en lugares donde es imprescindible tener cobertura a pesar del poco tráfico no llegue a amortizar la inversión que significaron para el operador.

Algunos operadores optan por realizar planes de negocios en el momento de definir sitios para nuevas BS, sobre todo procurando determinar si el flujo de caja resultante de los minutos cursados por mes, por ejemplo, genera utilidades para el operador una vez devengada la amortización de la inversión, el arrendamiento del sitio (sí corresponde) y sus costos operativos. Como se indicó anteriormente, puede ser necesario implementar cobertura aún en sitios en los cuales el volumen de minutos cursados por mes no amortiza los gastos e inversiones, pero una decisión estratégica, orientada por los departamentos de mercadeo, puede justificar la inversión por el beneficio que brinda al operador en su conjunto. También el análisis económico y estratégico puede resultar en la decisión de no brindar cobertura en determinadas zonas.

No siempre el objetivo de la planificación e la red de acceso es brindar cobertura en toda el área de servicio, sino en aquellos lugares donde se considera económicamente viable, u orientado con los objetivos comerciales del operador.

En resumen, la planificación de la red de acceso, no solo se basa en análisis técnicos del punto de vista de la ingeniería de la red, sino que en ella tienen una importante incidencia aspectos económicos y financieros, por la análisis de rentabilidad de la implementación y estrategia comercial. Este módulo no abordará el análisis de la viabilidad económica de un determinado plan de cobertura, se supondrá que el área considerada para la planificación y diseño reúne las condiciones económicas y comerciales que justifican su implementación.

2.1 Planificación de la Red de Acceso Celular

Como indicamos en el punto anterior, la red de acceso es generalmente el objeto de la mayor parte de las inversiones que realiza un operador para implementar una red

celular, y sus problemas de diseño son percibidos en forma muy negativa por los clientes.

La planificación va a estar orientada por tres indicadores de calidad de servicio fundamentales:

- El porcentaje del área de servicio del operador, donde la potencia de señal de radio intercambiada por la MS y la BS sea suficiente para que la comunicación se pueda establecer en condiciones de calidad de audio aceptables.
- La probabilidad que al intentar establecer una llamada, el usuario no lo pueda hacer por falta de canales de comunicación disponibles en la celda donde intenta originar. El mismo concepto se aplica para las llamadas terminadas en un usuario localizado en cierta celda.
- La probabilidad que a un usuario, desplazándose en el área de cobertura de una celda, se le interrumpa la comunicación por la culminación fallida de un proceso de traspaso a una celda vecina, o a otro canal de radio en la misma celda.

La determinación, por parte de un operador celular, de valores objetivo para estos indicadores de calidad de servicio, resultará en tres procesos de planificación que se deben realizar paralelamente, y que tendrán por cometido la realización de un proyecto de red de acceso acorde a los objetivos de calidad especificados.

- Planificación para determinar cobertura

Procurará que las áreas de cobertura de las celdas sean tales que la potencia de señal intercambiada entre MS y BS esté por encima de un umbral mínimo de potencia aceptable, dentro del área de interés para el operador. Es importante que el operador decida qué comprende esta área de interés, dado que la cobertura en cada punto depende de factores coyunturales que pueden requerir soluciones particulares, por ejemplo, si se desea cobertura dentro de edificaciones (llamada *indoor*) o dentro de vehículos (llamada *incar*), decidir si se van a cubrir sitios subterráneos como estaciones de metro, túneles, o incluso si se desea brindar cobertura en pisos altos de edificios, donde la interferencia hace virtualmente imposible las comunicaciones. En la medida que se desea asegurar la cobertura en un área virtualmente sin "agujeros", es

imprescindible disponer de información muy precisa de la zona, y hacer un modelado muy complejo de la propagación de las señales radioeléctricas.

- Planificación para capacidad de tráfico

Procurará que el número de interfaces radioeléctricas para comunicaciones en cada lugar del área de cobertura sea suficiente para las llamadas que se originan y terminan en dicha área, pero que no exceda las necesidades reales de la misma. Todo exceso en infraestructura en la implementación de la red se convierte en una inversión que se deprecia rápidamente y no se amortiza, generando mayores costos para el servicio brindado.

- Planificación para calidad de servicio

Procurará que cuando un usuario, con una llamada establecida, se desplace de un lugar a otro, dentro del área de servicio, la comunicación no se interrumpa por falta de vínculo radioeléctrico. Esto significa que se deberán solapar las áreas de estas intersecciones representan un porcentaje alto del área de cobertura, puede resultar en un sobredimensionamiento de la red, y nuevamente estaríamos incurriendo en inversiones que se deprecian rápidamente sin amortizarse. También procurará garantizar una transferencia de datos con baja incidencia de errores, en caso de que una llamada haga uso de la interfaz de radio por medio de un enlace digital.

Afortunadamente para nuestro análisis, los aspectos anteriormente mencionados son válidos, con pequeños matices, en todas las tecnologías hoy implementadas, en forma casi independiente de la banda del espectro raidoeléctrico que utilizan, y de la generación a la cual pertenecen. También haremos un análisis diferente en los próximos módulos, sobre todo lo referente al diseño para grado de servicio, cuando tratemos la transmisión de datos en los sistemas celulares.

Los tres procesos de planificación están fuertemente relacionados, por lo que decisiones relativas a un proceso deben ser analizadas en los otros dos. A los efectos de simplificar su comprensión, inicialmente los estudiaremos por separado, y luego analizaremos los compromisos técnicos que surgen de sus interacciones.

- Planificación para calidad de servicio

Procurará que cuando un usuario, con una llamada establecida, se desplace de un lugar a otro, dentro del área de servicio, la comunicación no se interrumpa por falta de vínculo radioeléctrico. Esto significa que se deberán solapar las áreas de cobertura de las BS, para asegurar la correcta transición de una a otra; pero si estas intersecciones representan un porcentaje alto del área de cobertura, puede resultar en un sobredimensionamiento de la red, y nuevamente estaríamos incurriendo en inversiones que se deprecian rápidamente sin amortizarse. También procurará garantizar una transferencia de datos con baja incidencia de errores, en caso de que una llamada haga uso de la interfaz de radio por medio de un enlace digital.

Afortunadamente para nuestro análisis, los aspectos anteriormente mencionados son válidos, con pequeños matices, en todas las tecnologías hoy implementadas, en forma casi independiente de la banda del espectro raidoeléctrico que utilizan, y de la generación a la cual pertenecen. También haremos un análisis diferente en los próximos módulos, sobre todo lo referente al diseño para grado de servicio, cuando tratemos la transmisión de datos en los sistemas celulares.

Los tres procesos de planificación están fuertemente relacionados, por lo que decisiones relativas a un proceso deben ser analizadas en los otros dos. A los efectos de simplificar su comprensión, inicialmente los estudiaremos por separado, y luego analizaremos los compromisos técnicos que surgen de sus interacciones.

2.2 Planificación para Cobertura

Los resultados del proceso de planificación para cobertura serán:

- Definición de la disposición geográfica de las BS. Esto significa que determinará en qué lugar específico deben ser instaladas las antenas receptoras y transmisora de las estaciones radiobase, los equipos de radio correspondientes se emplazarán a pocos metros de las antenas correspondientes por razones técnicas.
- Definición de la inclinación y potencia de transmisión de las antenas de las estaciones radiobase, resultando esto en la determinación de su radio de cobertura en torno a su emplazamiento.

De este proceso se obtiene la distribución geográfica de las BS, su potencia de transmisión, altura e inclinación de sus antenas para dar cobertura a las regiones elegidas por el operador. Como veremos más adelante la distribución geográfica de BS no solo va a ser condicionada por aspectos de cobertura.

El área de cobertura de una BS va a quedar definida por varios factores, pero básicamente dependerá de las potencias de transmisión empleadas en los equipos de radio, aspectos constructivos de la BS, y de las condiciones del terreno donde se va a reflejar la señal radioeléctrica. También las condiciones regulatorias que limiten la potencia de transmisión de las BS, pueden ser un dato importante a considerar en la planificación para cobertura. Las condiciones del terreno no pueden ser modificadas por diseño, como los demás factores mencionados, por lo que deberán ser bien determinadas por el operador, a los efectos de lograr predicciones de cobertura realistas durante la planificación.

La planificación para cobertura requiere que el operador disponga de mapas detallados del área de servicio, y es deseable se disponga información en tres dimensiones, lo que significa que no solo se considerará la distribución en el plano de las edificaciones, calles, grupos de vegetación, y accidentes geográficos, sino que también se considerará la altura de las construcciones, elevaciones, y cualquier otro elemento que puede llegar a interponerse en la dirección de propagación de las señales radioeléctricas. Estos mapas generalmente se manejan en formato digital, y son la información fundamental de entrada para las aplicaciones informáticas que colaboran en el proceso de planificación de la red, determinando los niveles de potencia de señal, en cada área bajo estudio, por medio de modelos de propagación.

Generalmente los mapas tridimensionales se logran por medio del procesamiento digital de fotografías aéreas obtenidas con iluminación solar oblicua sobre las edificaciones, y de no estar disponibles en los ayuntamientos o municipalidades constituye un gasto considerable para el operador obtenerlos.

2.2.1 La Celda

Si bien la hemos mencionado anteriormente en el curso, vamos a definir claramente el concepto de celda: La celda es el área geográfica cubierta con un nivel de potencia suficiente por la señal radioeléctrica emitida por la antena transmisora de una BS. Lo que se considera como nivel de potencia suficiente depende de la sensibilidad de los receptores, que generalmente se encuentra en el entorno de los -110 dBm. La antena puede estar localizada en el centro de la celda, en caso de ser omnidireccional, o en el borde de la misma si es direccional.

En las redes de acceso celulares se emplean dos tipos de antena, omnidireccionales y direccionales. Las antenas omnidireccionales se caracterizan por un patrón de irradiación (direcciones de emisión) uniforme en el plano horizontal, las direccionales presentan una dirección dominante de propagación, resultando en una apertura angular en el plano horizontal de 180º, 120º, 90º y particularmente de 60º, estas últimas muy utilizadas en ciudad. Las BS con antenas omnidireccionales se encuentran en el centro del área de cobertura de la propia BS, mientras que las BS con antenas direccionales se encuentran en el borde de las áreas de cobertura definidas por cada antena. Una BS puede ser el soporte físico de una celda o varias, dependiendo del tipo y número de antenas que se empleen.

La MS consta de una antena omnidireccional en el plano perpendicular a la misma; las posibles dificultades de recepción que puede encontrar la BS por la baja potencia de transmisión de la MS se compensan en parte por el uso de dos antenas receptoras en la BS. Esto constituye lo que se denomina diversidad espacial, y la distancia entre antenas es tal que los fenómenos de desvanecimiento en la señal del móvil, que presentan una cierta periodicidad espacial, se produzcan mínimamente en al menos una de las dos antenas en cada instante.

La forma y el tamaño de la celda depende de muchos parámetros tales como, el ERP (Effective Radiated Power o Potencia Efectivamente Radiada), el patrón de propagación de la antena, la inclinación de la antena respecto a la vertical (tilt), y las condiciones de propagación de la zona. En la práctica en una celda el RSL (Received Signal Level o Nivel de Señal Recibida) en su borde tendrá una forma muy irregular.

Por otro lado, la celda analítica, generalmente usada para planificación, se asume con una forma geométrica de hexágono perfecto, resultando de la superposición de áreas circulares de coberturas con idénticos radios, como se muestra en la Figura 2.1.

En la Figura 2.2 se puede ver la sectorización de una celda, que resulta de emplear antenas direccionales en vez de omnidireccionales. Una de las ventajas más importantes de sectorizar es la de especializar la cobertura de las antenas, minimizando la interferencia en otras celdas de la red que reutilizan las mismas frecuencias.

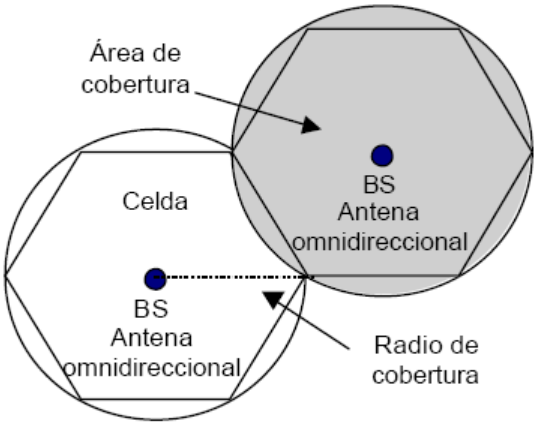


Figura 2.1: Celdas circulares resultantes de antenas omnidireccionales.

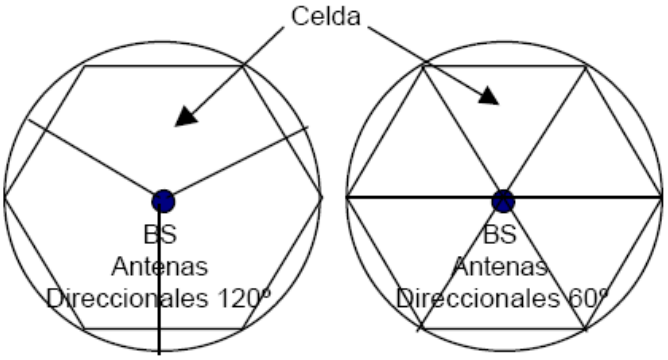


Figura 2.2: Celdas sectorizadas, resultantes de antenas direccionales.

2.2.2 Estudio de los Modelos del Enlace y Propagación

En principio la cobertura de la celda depende de los parámetros definidos por el operador, tales como la potencia de transmisión, la altura de la antena, su ganancia, ubicación y directividad. Existen muchos otros parámetros tales como, el ambiente de propagación, colinas, túneles, parques, y edificios, que afectan la cobertura

radioeléctrica. Estos parámetros no son modificables por el operador del sistema, varían de acuerdo al lugar y son difíciles de predecir.

En los últimos años han surgido varios modelos de propagación de señales radioeléctricas, dos de los más usados son el resultante de los trabajos de Okumura y Hata, apropiado para zonas urbanas y suburbanas, y que resulta de los trabajos de Walfisch e Ikegami, por ejemplo, apropiado para zonas densamente urbanizadas.

Estos modelos de predicción de cobertura se basan en el análisis experimental y estadístico de la propagación de señales radioeléctricas en las bandas empleadas en los sistemas celulares, para diferentes ambientes urbanos y suburbanos.

2.2.2.1 Pérdida de Trayectoria y Desvanecimiento por Múltiples Trayectos de Propagación

A la atenuación que sufren las señales de radio, al propagarse entre las antenas emisoras y receptoras en una red celular, se le denomina *pérdida de camino* (*path loss)*, los métodos anteriormente mencionados permitirán una estimación de la misma en diferentes ambientes de diseño.

Si la señal originada en las antenas de la BS se propagara a través del espacio libre, es decir sin obstáculos, se recibiría en un receptor, a medida que nos alejáramos de la antena emisora, con una potencia que disminuye según una regla directamente proporcional al inverso de la distancia a la antena al cuadrado. Esto quiere decir que si la potencia recibida a 1 Km de distancia es 0,1 Watts, a 2 Km de distancia es tan solo de 0,025 Watts. En este caso el modelo es simple.

El problema con las señales radioeléctricas es que al propagarse muy próximas a la superficie terrestre se reflejan en la Tierra. Considerando que la superficie terrestre se comporta como un conductor eléctrico, también los edificios, las estructuras metálicas y los vehículos reflejan señales radioeléctricas con mayor o menor facilidad dependiendo de sus materiales y el ángulo de incidencia de la señal en sus superficies; resulta en el receptor en la superposición de numerosas señales de radio reflejadas, que se suman a la que la BS y la MS intercambian directamente en su línea de visión.

La superposición de múltiples señales interferentes provoca lo que se denomina *desvanecimiento por múltiples caminos* (*Multipath Fading)*, y provoca que la atenuación de la señal radioeléctrica, a medida que el receptor se aleja de la antena, sea sensiblemente mayor a la que se produce en el espacio libre. En la Figura 2.3 se muestra un modelo simple de cómo se produce el desvanecimiento por múltiples caminos de propagación.

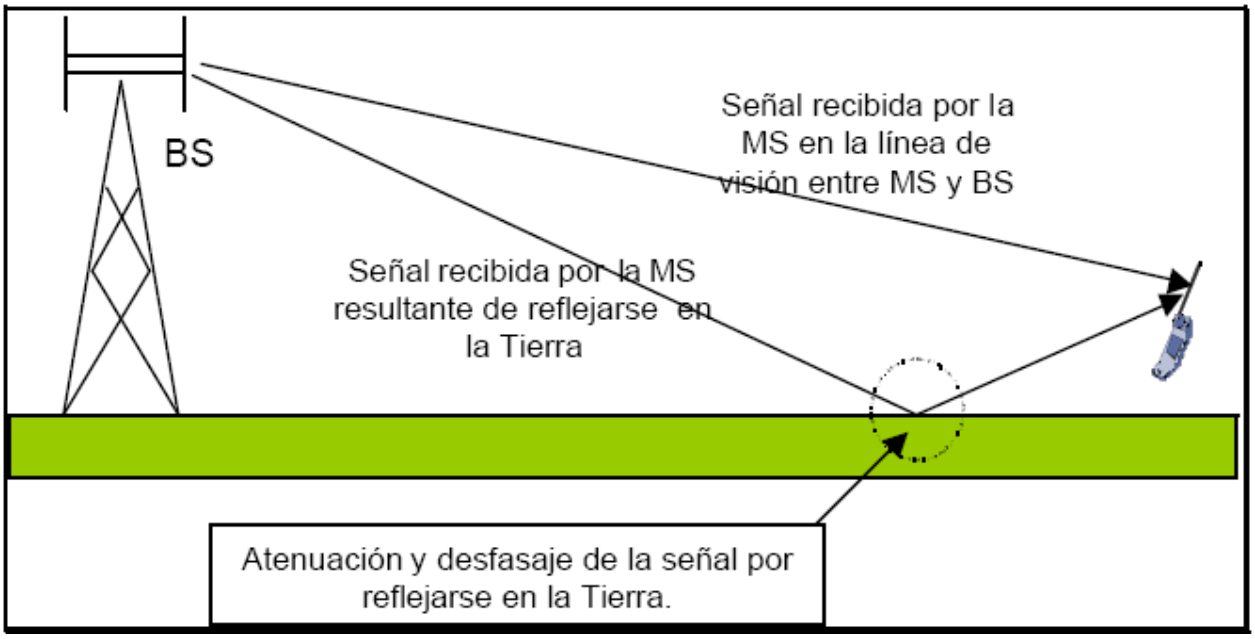


Figura 2.3 - Modelo simple de desvanecimiento resultante de múltiples caminos de propagación. La señal reflejada se interfiere en forma constructiva/destructiva en la señal recibida directamente en la línea de visión entre MS y BS.

Como consecuencia del desvanecimiento por múltiples caminos de propagación, la potencia recibida por la BS y la MS disminuye en mayor medida que el inverso del cuadrado de la distancia que los separa, resultando en que la señal se atenúa según un coeficiente proporcional al inverso de la distancia elevada a la cuarta potencia en zonas urbanas, e incluso a la sexta potencia en zonas con vegetación de denso follaje. Como el desvanecimiento de la señal no es evitable, siempre debe ser tomado en cuenta en la estimación de la pérdida del camino de propagación.

2.2.2.2 Modelos de Propagación

En este módulo vamos a abordar dos métodos de modelado de atenuación por propagación de la señal radioeléctrica en un sistema celular. Estos métodos son el de Okumura y Hata, y el Cost 231 de Walfish-Ikegami. No son los únicos modelos de propagación hoy empleados en los sistemas celulares, pero resultan representativos de los conceptos que deseamos exponer.

- *Modelo de Okumura y Hata*

El modelo de propagación de Okumura permite estimar la potencia recibida por la BS o la MS, en función de la potencia transmitida por la MS y BS respectivamente, un cálculo de atenuación que es dependiente de las condiciones particulares del área de cobertura, y la distancia entre la MS y la BS.
El modelo es válido para estimar las condiciones de propagación en cierto rango de frecuencias, de 150 MHz a 1920 MHz, en distancias que van de un mínimo de 1 Km hasta 100 Km, y para alturas efectivas de antenas de BS de 30 m a 100 m y de MS de 1 a 3 m.

Se basa en curvas de potencia recibida en función de la distancia, para diferentes bandas de frecuencia en una zona urbana; resultantes de mediciones realizadas por Okumura en la ciudad de Tokio y sus alrededores, en las frecuencias de 200, 453, 922, 1310, 1430 y 1920 MHz; y se sugieren factores de corrección para adaptarlas a las diferentes características del terreno y frecuencias de operación.

En base a un análisis estadístico se determinó la dependencia de la señal recibida con la distancia, frecuencia de operación, y altura de antenas.

Algunos años después del análisis de Okumura, Hata tradujo las curvas en un conjunto de ecuaciones matemáticas, que permiten realizar los cálculos por medio de aplicaciones informáticas. La pérdida de nivel de señal debido a la propagación (path-loss) se aproxima de la siguiente forma:

$$L_p(dB)=L_0(dB) + 10\gamma \log (d)$$

Donde:

- ✓ L_p = path loss, expresada en dB

- ✓ d = distancia entre la BS y la MS, expresada en Km (1<d<20)
- ✓ γ = path-loss slope (función del medio, que es mayor cuanto más densamente está construida la zona, g=2 se corresponde con propagación en el espacio libre)
- ✓ L_0 = intercept (función del medio que se ajusta según la altura efectiva de las antenas, etc.).

Siendo RSL el nivel de señal recibido por la MS, y ERP la potencia efectivamente radiada por la BS, se deduce que:

$$RSL = ERP - L_p$$

RSL debe estar por encima de la sensibilidad del receptor de la MS, para que ésta tenga cobertura. Generalmente éste es el mayor requerimiento, puesto que la BS presenta mayor sensibilidad de recepción que la MS, por el diseño de sus antenas de recepción.

En telefonía celular las antenas de recepción de las BS son generalmente dos, dispuestas espacialmente de modo que si una de ellas recibe un nivel de señal mínimo como consecuencia de la dispersión por múltiples caminos destructiva, la otra recibe un máximo por dispersión constructiva, un dispositivo selecciona la antena de la cual se tomará la señal.

- *Modelo de Walfish-Ikegami (COST 231)*

Este modelo surge de la aplicación conjunta de otros modelos que consideran que existe, y que no existe, línea de visión entre la BS y la MS.

En caso de distancias mayores a 200 m, con línea de visión entre la BS y la MS, considerando propagación a lo largo de una calle, resulta en una pérdida de camino (expresada en dB) resultante de la expresión:

$$L_{bc} = 42.6 + 26 \log(d) + 20 \log(f)$$

Con d (km) y f (MHz) distancia y frecuencia de operación respectivamente.

En caso de no existir línea de visión entre la BS y la MS, se introducen sumandos de corrección a la expresión anterior, que consideran la denominada difracción multi-

pantalla, y requieren de un análisis más complejo, que excede los objetivos de éste módulo.

El modelo de Walfish-Ikegami es aplicable a sistemas que operan en:

- ✓ Las bandas de frecuencia de 800 MHz a 2 GHz.
- ✓ Distancias de propagación de entre 200 m y 5 Km.
- ✓ Altura de antena de BS de entre 4 y 50 m (con lo que incluye microceldas), y altura del móvil de entre 1 y 3 metros respecto al plano de tierra.

2.2.2.3 Aplicación de los Modelos de Propagación

Una vez que conocemos la dependencia de la potencia de señal recibida con la distancia que separa a la BS de la MS, será posible analizar las condiciones de cobertura que el operador brinda a sus suscriptores.

Supongamos, por ejemplo, que logramos determinar que en una zona de algunas centenas de m2, la potencia de señal recibida por las MS en la calle sería de -85 dBm promedio, que la atenuación promedio de las construcciones es 20 dB (para cobertura *indoor*) y de los vehículos 5 dB (para cobertura *incar*), y que la sensibilidad de los receptores de la MS es de -110 dBm, podríamos concluir que hay cobertura adecuada en la calle, en parte de las construcciones (puesto que la potencia sería promedialmente de -105 dBm pero depende de la dispersión de la atenuación indoor), y en la totalidad de los automóviles. La potencia recibida indoor resulta de restar, a los -85 dBm, los 20 dB de atenuación de las paredes de las construcciones, resultando los -105 dBm que analizamos. Si en la zona considerada la potencia medida en la calle está por debajo de -90 dBm prácticamente no hay cobertura dentro de las edificaciones.

2.2.3 Interferencia

La interferencia de un enlace radioeléctrico consiste en la afectación del mismo por la existencia de una, o varias, señales originadas por el Hombre en la misma banda utilizada por el enlace. El control de fuentes de emisión radioeléctrica, que realiza generalmente el organismo regulador de las telecomunicaciones en cada país, minimiza la probabilidad de que la interferencia ocurra como resultado de señales emitidas por equipos no pertenecientes al operador, salvo en zonas fronterizas entre países1, por lo que sí se produce interferencia, generalmente es ocasionada por el mismo operador.

En las redes de acceso celulares se produce, lo que se denomina *reutilización de frecuencias,* debido a que el número de vínculos de comunicación radioeléctricos posible puede ser muy inferior al número de vínculos requeridos por el tráfico en el área de servicio. Esto es similar a lo que ocurre con la asignación de bandas para canales de TV abierta, radios AM y FM comerciales, en un país extenso.

En un mismo país pueden existir dos canales “4” de TV abierta (en la banda de VHF), pero se deben respetar distancias mínimas entre las dos implementaciones del mismo canal. La potencia de transmisión de cada emisora deberá estar cuidadosamente limitada para minimizar la probabilidad de interferencia para todas las diferentes condiciones de propagación atmosférica, muchas dependientes de factores meteorológicos. Los operadores celulares se ven en la necesidad de reutilizar las frecuencias de los canales radioeléctricos para sacar más provecho del espectro radioeléctrico que operan.

En los sistemas celulares se pueden identificar 4 tipos de interferencia:

A. Interferencia Co-canal.
B. Interferencia de canal adyacente.
C. Resultante de Intermodulación.
D. Interferencia intersimbólica.

A. Interferencia Co-canal

Cuando en un sistema celular se produce interferencia entre distintas implementaciones de un mismo vínculo o canal radioeléctrico se habla de *interferencia co-canal*. Esta interferencia se debe a la reutilización de iguales frecuencias en distancias relativamente pequeñas. Una relación que se emplea para caracterizar la interferencia co-canal es la llamada *relación portadora/interferente* o *C/I* (*carrier to interference ratio*), y consiste en el cociente entre la potencia promedio de señal recibida por la BS o MS, de la MS o BS respectivamente, y la sumatoria de las potencias promedio recibidas de las MS o BS respectivamente, pertenecientes a otras celdas del sistema.

La relación C/I (expresada en dB) debe ubicarse en el entorno de 18 dB en los sistemas TDMA que no emplean salto de frecuencia para disminuir la incidencia de interferencia

co-canal, y en el entorno de los 13 dB en aquellos que lo emplean. El método de salto de frecuencia consistente en modificar cada pocos milisegundos la frecuencia de portadora de un canal según una secuencia predeterminada de selección de portadoras, permitiendo mejorar la inmunidad de un canal radioeléctrico ante la interferencia, y así operar con relaciones C/I menos exigentes. El disminuir la exigencia de C/I permite operar con menores distancias de reutilización de una misma frecuencia, por lo que resulta en un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico.

Este razonamiento implica la aplicación de una importante simplificación, si consideramos las antenas de las BS, el que percibe la interferencia es la MS, no la BS, y la MS puede encontrarse en cualquier punto del área de cobertura de la BS considerada; por lo que se simplifica bastante el razonamiento si se considera que a pesar de estar algunas antenas más lejos o más cerca de la MS interferida, el resultado es equivalente a que la MS se encuentre donde la BS de su celda.

Llamaremos factor de reducción de la interferencia co-canal (*q*) al cociente *D/R,* es decir *q=D/R.* Donde R es el radio de la celda, y D es la distancia de reutilización de frecuencias empleada.

Si consideramos g como la constante de propagación (exponente al que se eleva el inverso de la distancia para determinar la pérdida de camino), la C/I se puede expresar en dB de la siguiente forma:

$$C/I = 10 \log [1/6(q)^{\gamma}] \text{ (expresada en dB)}$$

En general, al sectorizar las antenas se disminuye el número de interferentes, resultando en una expresión de C/I más general:

$$C/I = 10 \log [1/j(q)^{\gamma}] \text{ (expresada en dB)}$$

Donde *j* es el número de interferentes co-canal más próximas.

Ahora hagamos un ejercicio, trataremos de determinar la expresión de la relación C/I en un sistema celular con las siguientes características:

- ✓ Todas las celdas tienen igual radio de cobertura.
- ✓ Las antenas empleadas son omnidireccionales.

Si consideramos una antena omnidireccional en el centro de cada celda, y dado que todas las celdas tienen igual radio de cobertura, el número de interferentes, bajo el

supuesto que la reutilización de frecuencias ocurre en la menor distancia posible, a la que llamaremos D (*D* es la denominada *distancia de reutilización de frecuencias* en un sistema celular), geométricamente podemos determinar que el número de celdas interferentes, más próximas, es 6. El número de interferentes se determina considerando la cantidad de antenas omnidireccionales más próximas produciendo interferencia en la celda considerada, suponiendo que todas tienen igual radio de cobertura y están separadas la misma distancia entre sí; determinando que todas las antenas interferentes se encuentran sobre los vértices de un hexágono con centro en la BS omnidireccional interferida, por lo tanto son 6 las interferentes.

B. Interferencia de Canal Adyacente

La interferencia de canal adyacente es similar a la interferencia co-canal, pero las fuentes de señal que se interfieren no transmiten exactamente en la misma banda, sino en bandas adyacentes. La interferencia resulta de la fracción de potencia radiada en la banda adyacente que se introduce, por no estar correctamente limitada, en la banda considerada.

C. Interferencia de Intermodulación

Los transmisores de la BS y la MS emplean amplificadores de potencia, generalmente amplificadores clase C, que pueden presentar distorsión no-lineal. La distorsión no lineal consiste en la creación, por mal funcionamiento, de nuevas frecuencias en un amplificador, resultando en señales de radio interferentes si son irradiadas. Un problema similar puede ocurrir en los amplificadores de los receptores, dando lugar a la falsa detección de señales interferentes.

D. Interferencia Intersimbólica

Las señales radioeléctricas empleadas en los sistemas celulares están acotadas a bandas limitadas de frecuencia, a pesar de ser teóricamente de ancho de banda mucho mayor que el utilizado. En los sistemas que modulan digitalmente la portadora, se transmiten símbolos, consecutivamente en el tiempo, que representan uno o más bits codificados. Al reducir el ancho de banda, por medio de un proceso que se denomina *filtrado*, se afecta a la forma de la señal provocando que los símbolos que codifican los bits se deformen extendiéndose en el tiempo, por lo que se solapan unos con otros. El

solaparse los símbolos se confunden unos con otros, resultando en errores en la identificación de los mismos en la MS y en la BS.

2.2.4 Ruido Radioeléctrico

El ruido es un fenómeno natural que afecta a toda comunicación que emplea el espectro radioeléctrico, y es consecuencia de las virtualmente infinitas fuentes de señales de radio que existen en el Universo. Si se trabaja con señales radioeléctricas con potencias promedio por encima de –105 dBm, el ruido radioeléctrico no constituye un problema, por lo que no se considerará en la planificación y diseño de las redes celulares.

2.2.5 Concepto de Presupuesto del Enlace

El presupuesto del enlace resulta del conjunto de ecuaciones que relacionan la performance del sistema según sus condiciones de propagación en radiofrecuencia.

En estas ecuaciones se aplican diferentes criterios para cobertura, de modo que se pueda brindar cobertura *outdoor*, *indoor* e *incar*.

La ecuación de presupuesto del enlace calcula la máxima pérdida de potencia que se puede producir en los dos sentidos de propagación, el ascendente, y el descendente, compatible con una comunicación estable entre la MS y la BS.

Para determinar el link budget se deben conocer:

- Ganancia de la antena de la BS: GBS (expresado en dB)
- Sensibilidad del receptor: RSMS para la MS, y RSBS para la BS (expresados generalmente en dBm).
- Potencia de salida nominal: PMS para la MS y PBS para la BS (expresado generalmente en dBm).
- Pérdida en los elementos de conexión de los transmisores y las antenas de la BS (jumpers y feeders): Lf (expresado en dB).
- Margen de atenuación para alta calidad: MHQ (expresado en dB) que opera como margen de seguridad en la determinación de la atenuación del vínculo entre la MS y la BS previendo fluctuaciones de atenuación no modeladas.

Dado que el enlace celular es bidireccional, y que la distancia entre MS y BS es la misma en los dos sentidos de comunicación, el link budget procura determinar en cuál sentido de propagación hay menos margen para atenuación por pérdida de camino, considerando la respectiva sensibilidad de los receptores y la respectiva potencia de transmisión de los transmisores.

La pérdida de camino en el enlace descendente (expresada en dB) resulta en:

$$PLfl = PBS - Lf + GBS - (RSMS + MHQ)$$

La pérdida de camino en el enlace ascendente (expresada en dB) resulta en:

$$PLrl = PMS - Lf + GBS - (RSBS + MHQ)$$

La pérdida de camino máxima admisible en el diseño de la cobertura de una celda resultará de la menor de las dos anteriores.

Una vez determinada la pérdida de camino máxima, y conociendo las condiciones de propagación en la celda estudiada, es posible determinar el mayor radio de cobertura admisible.

2.2.6 Métodos de Evaluación de la Planificación para Cobertura

Una vez realizada la planificación se puede verificar el diseño por medio de aplicaciones informáticas de predicción de cobertura. Para que los resultados obtenidos por estos programas sean de utilidad es imprescindible que cuenten con información detallada sobre, las características del terreno, edificaciones y disposición de calles. Los resultados son útiles si la predicción de cobertura que realizan se aproxima a la realidad.

Otra herramienta fundamental para el planificador y diseñador es la medición directa, recorriendo el área de cobertura de cada celda con un medidor de potencia de señal recibida y un terminal GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para correlacionar las medidas con las coordenadas geográficas en las cuales se obtuvieron, a los efectos de corregir el modelo de predicción empleado. Esta práctica de ajuste de parámetros en el modelo por medición directa procesada estadísticamente, recibe el nombre, generalmente, de *drive-test*. Los drive-test deben ser realizados periódicamente en el área de servicio de un operador porque pueden cambiar las condiciones de cobertura por modificaciones en el entorno.

2.3 Planificación para Grado de Servicio

Planificar para grado de servicio consiste, básicamente, en determinar los radios de cobertura de las celdas de modo que se puedan cursar llamadas originadas y terminadas dentro de su área de cobertura, sin una pérdida considerable de llamadas por falta de recursos radioeléctricos (canales) para cursarlas.

Las llamadas que no encuentran canales disponibles en una BS pueden ser cursadas a través de una BS adyacente a la primera, siempre que la MS esté dentro de su área de cobertura, de lo contrario la llamada se pierde por falta de canales, lo que se conoce como bloqueo.

Las llamadas que no encuentran recursos simplemente se pierden, o lo que es equivalente, se bloquean. En esta etapa de planificación se determinará el radio de las celdas en función de la cantidad de llamadas simultáneas que puede cursar, con una cierta probabilidad que las nuevas llamadas que arriben no encuentren canales radioeléctricos disponibles.

El parámetro de diseño en los sistemas basados en bloqueo es el porcentaje de los intentos de comunicación es aceptable que se pierda por bloqueo. Generalmente se desea que la pérdida sea baja, y pase prácticamente inadvertida por los usuarios, incluso las MS la disimulan al reintentar más de una vez establecer una comunicación si encuentran bloqueo. Generalmente se procura que las llamadas que se pierden no sean más de 1 o 2 de cada 100 que se intentan en la hora de mayor utilización de la red.

Es importante considerar que el dimensionamiento para capacidad de tráfico de la red celular se deberá realizar para la hora de mayor utilización en un día representativo del año, generalmente sin considerar días festivos en los que se produce un extraordinario aumento de intentos de llamadas (por ejemplo el 31 de diciembre). En los días festivos se asume una mayor pérdida en la red, puesto que la inversión necesaria para soportar tales situaciones no es amortizable con las llamadas que se cursan adicionalmente únicamente en estos días.

Alguien puede preguntarse por qué es necesario definir la probabilidad de bloqueo, dado que se podría diseñar el sistema para que no haya pérdida de comunicaciones. La respuesta es que si de diseñara para que la probabilidad de pérdida sea nula, se debería invertir en una infraestructura quizás decenas de veces más grande, que

produciría prácticamente los mismos ingresos al operador, haciendo totalmente inviable el negocio.

2.3.1 Patrones de Reutilización de Frecuencias

Considerando que las licencias para los operadores celulares se corresponden con la asignación de una banda limitada del espectro radioeléctrico, que cada tecnología divide esta banda en portadoras de cierto ancho de banda (tal que se pueda asignar un número entero de portadoras a la banda), y que cada portadora implementa un cierto número de canales radioeléctricos para comunicaciones telefónicas; el número total de canales de comunicación disponibles en una banda de telefonía celular es limitado. El número de canales disponibles en una tecnología es, generalmente, muy inferior al número de llamadas que un operador cursa simultáneamente en su red, en la hora de mayor utilización durante el día.

Esto hace necesario establecer un mecanismo que permita reiterar el uso de frecuencias dentro del área de servicio del operador, a esto se le denomina *reutilización de frecuencias*. Como es imprescindible evitar, o al menos minimizar, la interferencia co-canal, se proponen patrones geométricos de reutilización que procuran garantizar una distancia de reutilización de una misma frecuencia tal que la interferencia co-canal que resulte sea tolerable por el sistema considerado. Los patrones de reutilización permiten definir una grilla básica de celdas, sobre la cual se ajusta el diseño.

Un aspecto importante a la hora de elegir una tecnología es conocer su tolerancia a la interferencia co-canal, generalmente por medio de su relación C/I mínima aceptable. Cuanto menor sea la C/I que puede tolerar un sistema, menor será la distancia de reutilización de una misma frecuencia, y por lo tanto mayor la posibilidad de reiterar su uso dentro del área de cobertura. Cuanto menor es la distancia de reutilización menor es el número de celdas en el patrón, resultando en una mayor eficiencia en el uso del espectro. Para posibilitar una reutilización de frecuencias adecuada en todas las celdas, se implementa un patrón geométrico que puede ser reiterado en toda el área de servicio, de modo que la reutilización del patrón prácticamente garantiza que no ocurra

interferencia co-canal. Al grupo de celdas que forma la estructura básica del patrón se le denomina *conglomerado*.

Cuanto mayor es el número de celdas en el conglomerado, más ineficiente será el sistema del punto de vista de troncales (concepto que veremos más adelante en éste módulo), dado que el mismo número de canales se dividirá en un número mayor de celdas, resultando en menor número de canales por celda. Se denomina K al *factor de reutilización* asociado al patrón. K=1 significa que la misma frecuencia puede ser empleada en todas las celdas de la grilla, mientras que K=4 implica que el conglomerado está formado por cuatro celdas, y son estas cuatro las que se repiten geométricamente, cubriendo la totalidad del área de servicio. A mayor valor de K mayor distancia de reutilización de una misma frecuencia en el patrón, esto resulta de la relación $D = [3KR]^{1/2}$. La Figura 2.4 permite observar la dependencia con el número de celdas en un conglomerado, de la distancia de reutilización de una misma frecuencia. K=4 presenta una distancia de reutilización menor que K=7, por lo que su relación C/I es peor. Si un sistema tolera la C/I de K=4, caso de la tecnología GSM, presentará mejor eficiencia en troncales que otro que no lo soporta, tal como ocurre con TDMA IS-136 dado que requiere K=7. CDMA trabaja con K=1, pero es importante acotar que en esta tecnología la reutilización no se produce en las portadoras, por esta razón este análisis no se aplica adecuadamente a los sistemas basados en CDMA.

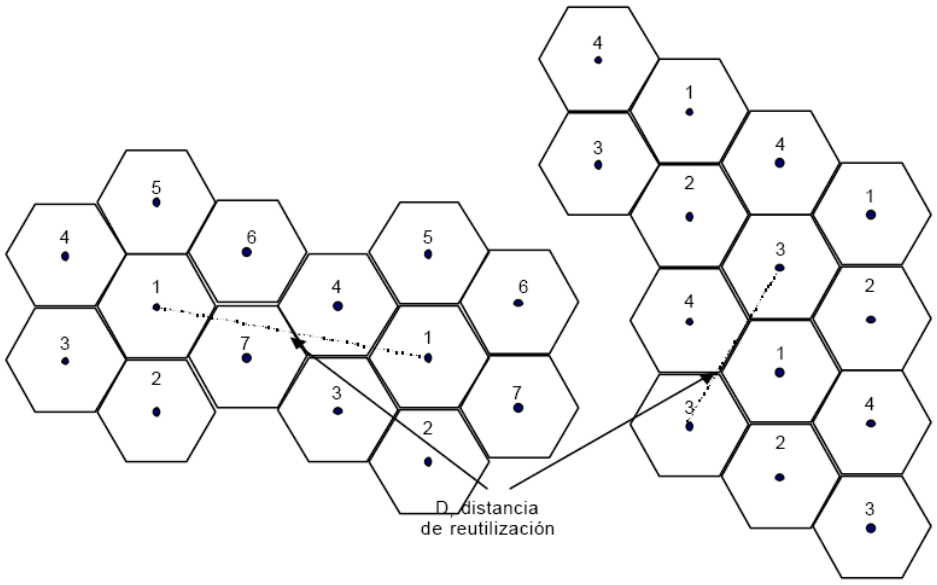


Figura 2.4: A la izquierda patrón de reutilización K=7, a la derecha K=4 (menor patrón de reutilización posible exceptuando K=1).

El definir un patrón de reutilización permite, al conocer la estructura básica de su conglomerado de celdas, realizar una primera distribución de celdas para un área de servicio para ser cubierta. Los radios de las celdas resultarán de condiciones de tráfico de la red que se analizarán a continuación en éste capítulo. La definición del patrón de reutilización resulta en la definición del plan de frecuencias a emplear en cada celda de la red de acceso celular.

En esta primera distribución de celdas se parte del supuesto de que todas tienen igual radio de cobertura para poder aplicar el patrón.

Cuando un operador inicia operaciones con una nueva tecnología lo que importa fundamentalmente es asegurar la cobertura, dado que el tráfico inicial va a ser sensiblemente inferior a la capacidad en canales de las celdas. Un operador que recién comienza no tiene clientes propios, por lo que al comercializar los primeros servicios deberá brindarle fundamentalmente cobertura, la capacidad de tráfico resulta menos relevante.

Si las celdas se implementan según un patrón de reutilización consistente con la distancia de reutilización, que corresponde a la relación C/I mínima aceptable para la tecnología que se utiliza, las ampliaciones que se deberán hacer se deberán mantener consistentes con el patrón de reutilización, en tal caso la interferencia co-canal se podrá mantener bajo control. Los requerimientos de ampliaciones resultan del aumento en la oferta de tráfico, o en el aumento de nivel de potencia para favorecer la cobertura *indoor*.

2.3.2 Modelo de Tráfico de los Abonados

Uno de los desafíos que plantea el diseño de una red de telecomunicaciones es determinar cuántos recursos asignar para que todos los usuarios puedan establecer comunicaciones cuando lo deseen percibiendo una mínima falta de recursos, siempre que los usuarios se comporten en forma predecible, y modelable por medio de parámetros estadísticos. Esto permitirá evitar inversiones en equipamiento adicional que producirá menores ingresos por su escaso uso, afectando los beneficios del negocio.

En telefonía celular no podemos predecir en forma exacta cuántos usuarios vamos a tener en cada lugar del área de servicio, y mucho menos cuándo van a realizar llamadas, por lo que generalmente se hace un modelo estadístico de distribución de usuarios y de tasa de utilización individual del servicio.

El objetivo de modelar el tráfico es determinar qué capacidad de canales es necesaria en cada celda para atender las necesidades de los usuarios, de modo que la probabilidad que un usuario no encuentre recursos, en el momento en que establece su comunicación, sea muy baja. Generalmente esto se traduce en lo que se denomina sobreasignación de recursos a los usuarios, en el entendido que un mismo canal radioeléctrico puede estar asignado simultáneamente a decenas de usuarios potenciales, de los cuales va a poder hablar solo uno a la vez.

2.3.2.1 Intensidad de Tráfico

Recordamos que la intensidad de tráfico cursada por un conjunto de canales resulta de sumar todos los tiempos de ocupación de cada uno de los canales durante un intervalo de observación, y al valor resultante dividirlo por la duración del intervalo de observación. Típicamente se mide en Erlangs, y se puede interpretar que 1 Erlang equivale a un canal ocupado durante el 100% del tiempo de observación, esto no quiere decir que 1 Erlang resulte exclusivamente de un solo canal durante el tiempo de observación. A continuación se describe la forma de calcular el tráfico promedio cursado por un conjunto de canales durante un período de observación de una hora.

T (Erlang) = Número de llamadas durante una hora x Duración promedio de las llamadas (seg) / 3600 (seg)

La intensidad de tráfico, ofrecida a un conjunto de canales, y el grado de servicio definido por el operador celular, son utilizados para determinar el número de canales necesarios para su cumplimiento. La determinación del número de canales, si el sistema considerado se basa en bloqueo de llamadas, se hace por medio de las fórmulas de cálculo que se desarrollan al final de este módulo. A los efectos de la determinación de la intensidad de tráfico no cuenta quién origina la comunicación, por lo que se deberán sumar tanto las llamadas terminadas como originadas.

2.3.2.2 Grado de Servicio

El grado de servicio (GOS o Grade of Service) se define como la probabilidad de pérdida de llamadas que arriban a un conjunto de canales. Esto significa que un grado de servicio de 1% se puede interpretar como que promedialmente se bloquearán 1 de cada 100 llamadas ofrecidas a la red celular, por no disponer el sistema suficientes canales para cursarla en el momento de su ocurrencia.

Por medio de la *1ra fórmula de Erlang*, o *Erlang-B*, para sistemas basados en bloqueo, es posible determinar el grado de servicio de un conjunto de canales al que se le aplica una determinada intensidad de tráfico. En el punto 4.6 de este módulo se estudiarán las hipótesis que hacen posible la aplicación de dicha fórmula, y la fórmula propiamente dicha; también se analizará la fórmula de *Engset*, que también se puede aplicar en sistemas basados en bloqueo, pero donde no se cumple la hipótesis de que la cantidad de posibles originadores de llamadas sea muy grande (30 veces más como mínimo) respecto a la cantidad de canales disponibles. La fórmula de *Erlang-C*, para sistemas basados en espera, no es aplicable al dimensionamiento de los canales de una BS. *Erlang-C* sería aplicable a sistemas donde la llamada queda en espera, sin disolverse, hasta que un canal se hace disponible. La aplicación típica de *Erlang-C* es el dimensionamiento de colas de espera para sistemas de atención de llamadas; también se aplica para dimensionar otros elementos de una red de telecomunicaciones que gestionan colas de espera.

Es importante considerar que en el área de cobertura de una celda se produce, de hecho, una sobreasignación de recursos, en el sentido que estadísticamente cada usuario solo se le asigna promedialmente una fracción de canal para sí, cuando se planifica el sistema. Los canales no pueden ser asignados fraccionalmente a los usuarios en el momento de establecerse una comunicación, por lo que puede ocurrir que cuando un usuario desee establecer una comunicación no encuentre canales disponibles.

El valor del grado de servicio, en el diseño de las redes celulares, es el que nos permite estimar qué probabilidad hay de que las llamadas al originarse no encuentren recursos disponibles, y vamos a diseñar para que dicha probabilidad sea despreciable frente a otras causas posibles de que no se pueda realizar una llamada.

Todas las llamadas se perderían si el grado de servicio es 1, y todas las llamadas encontrarían recursos para cursarse si el grado de servicio es 0. Generalmente el grado de servicio definido en un sistema celular móvil es 0,02; es decir que por diseño no se deben perder más del 2% de las llamadas originadas o terminadas en un usuario de una celda, por falta de canales libres.

2.3.2.3 Eficiencia en Troncales

La *eficiencia en troncales*, o eficiencia de utilización de los canales, es una medida de la eficiencia de los canales implementados en las BS. Resulta de determinar la relación porcentual entre el tráfico cursado de diseño, y el número de canales de una celda, para un determinado grado de servicio.

Eficiencia (%) = Tráfico en Erlangs x 100 / Número de canales

- ✓ A los efectos de comprender este aspecto veamos un ejemplo:

Se considera una celda omnidireccional con 48 canales, y se desea comparar la capacidad de tráfico de ésta con la que resultaría de sectorizar 120º la celda, repartiendo equitativamente los 48 canales en cada sector.

	Celda omnidireccional	Celda sectorizada
Total de canales	48	16
Grado de servicio	0.02	0.02
Intensidad de tráfico (*)	38.4 Erlangs	9.83 Erlangs
Eficiencia en troncales	38.4/48 = 0.8 (80%)	29.49/48 = 0.614 (61.4%)

(*) Obtenido por resolución numérica de las ecuaciones despejadas de Erlang-B.

Mientras que los 48 canales pueden cursar 38.4 Erlangs, para igual grado de servicio los tres sectores pueden cursar algo menos de 30 Erlangs. Este ejemplo demuestra que en el caso de sectorizar vamos a tener que instalar 48 canales de radio, pero su performance promedio máxima va a ser equivalente a utilizar 30, los canales adicionales son necesarios para absorber las fluctuaciones instantáneas en la oferta de llamadas. En general, cuánto menor es el número de canales, mayor porcentaje de

ellos deberá ser reservado para absorber las fluctuaciones instantáneas en el arribo de nuevas llamadas.

Es muy importante considerar la eficiencia en troncales en la elección de una tecnología celular, puesto que cuántos más canales permite por celda y sector, mayor será su eficiencia, dado que se cursarán más minutos de llamadas facturables promedialmente por canal.

2.3.3 Análisis de Ingeniería de Teletráfico

2.3.3.1 Determinación del Área de Cobertura de una Celda en Función del Tráfico Ofrecido y del Número de Canales

En todas las tecnologías celulares se prevé la división del espectro en portadoras, y a éstas se les asigna un cierto número de canales de comunicación. El número de canales de comunicación por portadora varía, típicamente, de 1 a 20 según el sistema que se elija.

Considerando que para disponer de suficientes canales de comunicación para la totalidad del tráfico que se curse en el área de servicio es necesario reutilizar portadoras y canales, y que, a los efectos de minimizar la interferencia co-canal, se emplean patrones de reutilización de frecuencias, todo sistema dispone de un número máximo de canales posibles por celda.

A partir del máximo número de canales, y conociendo el grado de servicio deseado, es posible determinar el tráfico máximo en Erlang que se debería ofrecer a la celda. Para la planificación es necesario conocer dos datos fundamentales:

- Densidad de usuarios celulares del operador en el área prevista para cobertura de la celda (usuarios/Km2).
- Tráfico telefónico por usuario promedio, considerando el perfil socioeconómico de la zona a cubrir. Esto resulta en una estimación de Erlangs/usuario.

La composición de ambos (su producto simple) permite obtener la densidad de tráfico del área en Erlangs/Km2. Si la celda no puede cursar más que *A* Erlangs por su número de canales, y considerando el grado de servicio deseado, el área de cobertura no debe superar *A* dividido por la densidad de tráfico por Km2. Si se supone, por simplicidad, que la celda tiene forma circular, basta despejar su radio de la expresión que permite obtener el área del círculo. De esta forma es posible determinar el radio de cobertura

que se deberá diseñar para propagación radioeléctrica, ajustado al tráfico de la celda, y por consecuencia el tamaño de las celdas en el patrón de reutilización.

La densidad de usuarios, generalmente, no es uniforme en el área de servicio, por lo que es poco probable que se repitan radios de cobertura en el patrón, dando lugar a celdas hexagonales.

Ejemplo:

- Supongamos que 48 es el máximo número de canales por celda omnidireccional de una determinada tecnología, y que el grado de servicio de diseño, según decisión del operador, es 2%.
- Supongamos adicionalmente que la densidad de usuarios por Km2 es 100, y que promedialmente se originan 0,01 Erlang/usuario en la hora de mayor utilización de la red.

La densidad de tráfico por Km2 resulta de multiplicar 0,01 Erlang/usuario x 100 usuarios/Km2, resultando en 1 Erlang/Km2. Los 48 circuitos en una celda, con un grado de servicio de 2%, pueden cursar 38,4 Erlangs (obtenido de despejar por métodos numéricos en la expresión de Erlang-B del Anexo 1), resultante en que la celda puede tener una superficie de aproximadamente 38 Km2, o un radio, si es circular, de 3,5 Km.

La potencia del transmisor de la BS, la altura e inclinación de las antenas emisora y receptoras, se deberán ajustar para que la cobertura sea de 3.5 Km de radio, considerando para ello un determinado emplazamiento de la BS en el área bajo estudio. Este condicionamiento sobre el radio de la BS, resultante de aplicar el proceso de planificación para cobertura, será decisivo para determinar la distribución de las celdas en el área de servicio.

La disposición de las BS está fuertemente condicionada por la disponibilidad de sitios adecuados para su emplazamiento, por lo que frecuentemente se deben corregir las estimaciones de radio de cobertura para tráfico, para contemplar el sitio particular donde se instala. La sugerencia inicial de sitios para emplazamientos, que frecuentemente no se logran obtener por razones de costo de arrendamiento o reglamentos de construcción adversos, culmina con una designación de sitios alternativos, que lleva a un nuevo ajuste de los radios de cobertura para satisfacer las necesidades de tráfico de la nueva disposición de BS.

2.4 Planificación para otros aspectos de Calidad de Servicio

La *calidad de servicio* es un concepto amplio que involucra otros aspectos tales como:

- ✓ Tasa de error de bit correspondiente al enlace de datos celular. A partir de los sistemas de 2da generación el enlace de radio está diseñado básicamente para transmisión de datos, por lo que la voz es convertida en un flujo de bits, y se transfiere empleando un protocolo digital particular en el enlace radioeléctrico. Generalmente se habla de tasa de error de bits (BER) del enlace de radio. A mayor BER peor calidad de audio dado que se pierde información de voz, degradándose la comunicación hasta hacerla incomprensible.
- ✓ Probabilidad de que la comunicación se interrumpa en un proceso de traspaso.
- ✓ Latencia y tasa de transferencia de bits en los sistemas celulares que realizan transmisión de datos empleando protocolos de paquetes.

Una alta tasa de error de bit es provocada básicamente, si no se producen problemas de cobertura, por las interferencias co-canal y de canal adyacente. Una alta tasa de error de bit se manifiesta con una calidad poco aceptable de las comunicaciones vocales, debido a que se escucha el audio en forma entrecortada por pérdida de información.

Los problemas de latencia y tasa de transferencia de bits en los sistemas que emplean protocolos de paquetes, serán abordados cuando se analicen dichos sistemas en los módulos subsiguientes.

2.4.1 Resolución de Interferencia co-Canal y de Canal Adyacente

La interferencia co-canal se resuelve ajustando la implementación de los patrones de reutilización, procurando obtener mayores distancias de reutilización, adecuando la potencia de las BS de modo que se disminuya el radio efectivo de cobertura. También se pueden aplicar técnicas de especialización de cobertura en las zonas donde se produce mayor interferencia, tal es el caso, por ejemplo, en pisos altos de edificios.

Otra manera fundamental de minimizar los efectos de la interferencia co-canal es por medio del control de potencia de transmisión. Las MS pueden, dependiendo de la

tecnología empleada, operar con diferentes niveles de potencia de transmisión. Estos niveles son determinados por la red celular y solicitados a la MS, de modo que ésta transmita con la mínima potencia compatible con una calidad adecuada de comunicación. El control de potencia se ha ido perfeccionando en la medida que los sistemas evolucionan, y puede ser un requisito imprescindible para el funcionamiento de una tecnología, tal es el caso de CDMA.

La interferencia de canal adyacente se minimiza empleando conjuntos de canales en cada celda que no son adyacentes entre sí, dando lugar a bandas de guarda entre los diferentes canales de una misma celda. Si un canal adyacente es empleado en una celda vecina, su interferencia va a resultar atenuada por la distancia involucrada. En cada implementación tecnológica se toman especiales cuidados en la distribución espectral de los canales empleados en cada celda de los patrones de reutilización.

2.4.2 Planificación de Zonas de Traspaso

El proceso de traspaso consiste en asignar a una MS en conversación un nuevo vínculo de radio, perteneciente a la misma celda o a una celda diferente, dependiendo de su causa, antes que por falta de cobertura sea imposible mantener la comunicación. La red celular no puede determinar exactamente dónde se encuentra la MS (ahora algunos sistemas lo pueden hacer, pero no se considera la posición geográfica para el proceso de traspaso), pero puede inferirse de la disminución de potencia recibida desde la MS, y por el aumento de la tasa de errores en la comunicación, que la MS se está alejando del área de cobertura de la BS, por lo que la BS informa al BSC o MSC (según la tecnología), disparándose un proceso que involucra a la MS y al BSC/MSC en la tarea de encontrar un nuevo vínculo de radio de calidad adecuada para mantener la comunicación.

El proceso de traspaso se debe completar antes que la MS quede sin cobertura, puesto que no habrá forma de informar a la MS qué nuevo canal sintonizar si el vínculo se corta. Para que el mecanismo de traspaso no falle, debe transcurrir suficiente tiempo desde que se decide el proceso hasta que queda sin cobertura, para que se pueda completar la designación del nuevo canal a la MS. Si las zonas de solapamiento de cobertura entre BS (o celdas) son pequeñas, la probabilidad que el proceso se complete

con éxito dependerá de la velocidad a la que se aleja la MS de las áreas de solapamiento de cobertura para traspaso.

- Cuantos mayores son las áreas de solapamiento, mayor probabilidad de éxito del mecanismo de traspaso, pero mayor probabilidad de interferencia entre BS y menor aprovechamiento de los radios de cobertura implementados.
- Cuanto más rápido se desplazan las MS (por ejemplo en automóviles) menos tiempo para realizar el traspaso, por lo que en las vías rápidas (rutas, autopistas) se deberá procurar que la mayor dimensión del área de solapamiento entre áreas de cobertura esté alineada con la vía rápida.

Un indicador de las condiciones de calidad de servicio es el porcentaje de llamadas que fallan en el proceso de traspaso. Las diferentes tecnologías han abordado y resuelto el problema de traspaso de formas tales que procuran minimizar la probabilidad que el vínculo de comunicación entre la MS y la BS se pierda antes de completar el proceso. El proceso de traspaso es muy dependiente de la tecnología estudiada, ya mencionamos en los módulos sobre 1ra y 2da generación las diferentes formas que toma el proceso de traspaso dependiendo de la técnica de multiplexación de canales en la interfaz de radio. Ahora conocemos cuáles criterios técnicos se aplican para posibilitar la continuidad de las comunicaciones establecidas cuando los usuarios se desplazan.

2.4.3 El Proceso de Diseño y Planificación

El diseñar para cumplir con los requerimientos anteriormente expuestos es un proceso que presenta algunas dificultades. El resultado del diseño será la definición de dónde y en qué condiciones instalar las BS, esto pasa por determinar sitios concretos donde emplazar las antenas de transmisión y recepción. Los sitios no son propiedad del operador, al menos en el momento de su definición, por lo que deberán ser obtenidos por medio de acuerdos de arrendamiento o adquisición (si son de propietarios privados), como puede ser el caso de azoteas y algunos predios; o por medio de permisos de los ayuntamientos o municipios, en caso de ser sitios públicos. En todos los casos, la disponibilidad del sitio pasa por un proceso de autorización e inversiones que el operador no controla totalmente. Esto puede resultar en la necesidad de definir sitios alternativos, próximos a los designados originalmente pero no exactamente los

mismos, haciendo necesario analizar nuevamente las condiciones de cobertura, capacidad de tráfico, y posibilidades de traspaso. Esto genera un proceso iterativo, generalmente representado como un diagrama de flujo donde se entra en un bucle del cual se sale una vez obtenidos todos los sitios necesarios para las BS.

Otro aspecto a considerar es la necesidad de levantar torres o mástiles de gran altura respecto a emplear azoteas de edificios próximos a los sitios designados por el proceso de diseño. En este caso, las economías resultantes de no realizar una obra civil considerable pueden compensar con creces el esfuerzo de volver a planificar la cobertura de una zona. También pesa en la decisión de un sitio la disponibilidad de energía eléctrica y cableados de telefonía o fibra óptica; la energía eléctrica es un recurso imprescindible para la BS y debe llegar en cables por las potencias involucradas (se descarta prácticamente el uso de energía solar). La falta de recursos cableados para la conexión a la red de transporte de algún operador se puede suplir con enlaces de radio basados en microondas, que vinculen el sitio de la BS a la red de transporte de otro operador o el mismo operador celular.

A continuación se muestra, en la figura 6, un diagrama simplificado del proceso de planificación de celdas. Tal y como se aprecia en la siguiente figura.

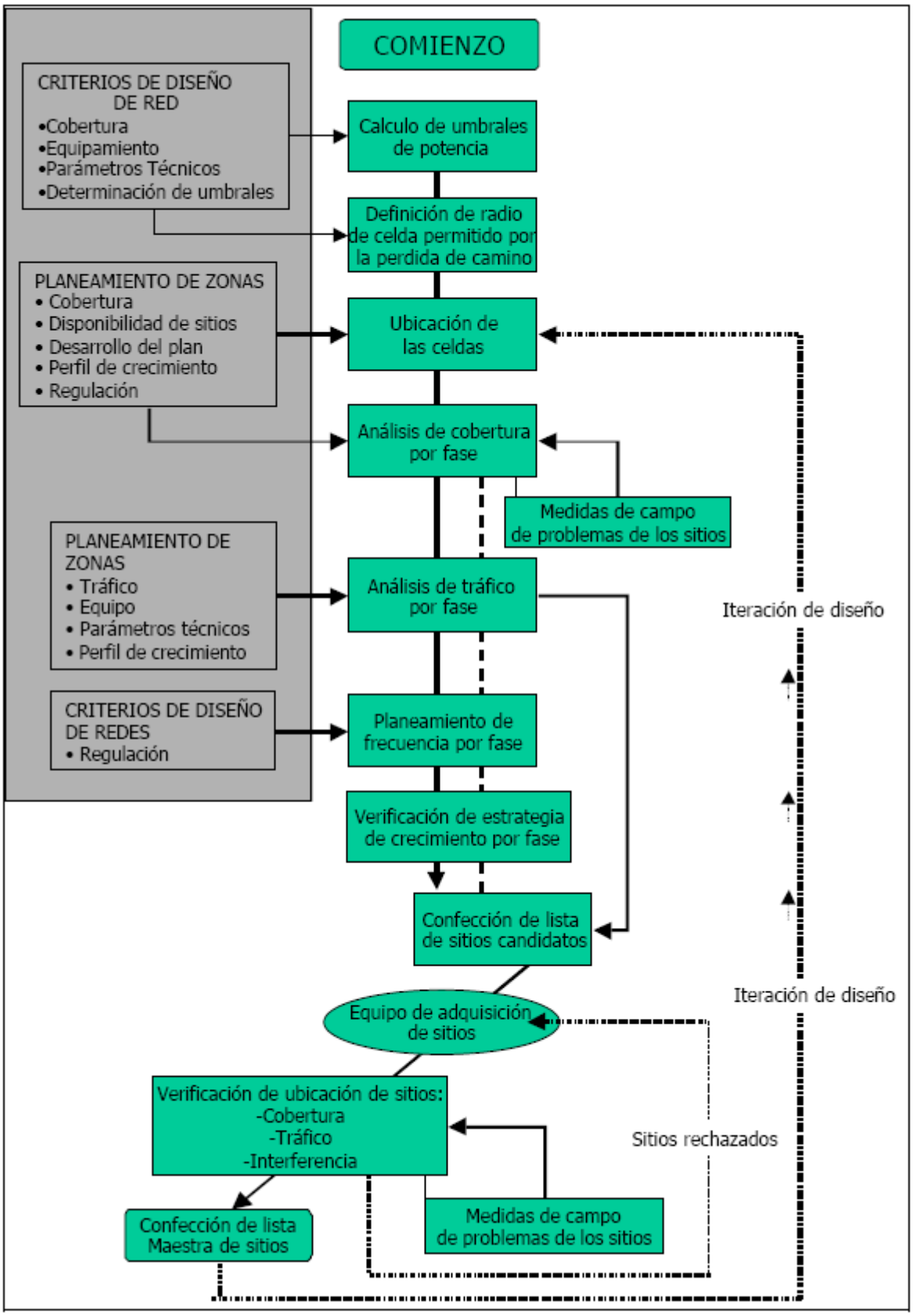

COMIENZO
CRITERIOS DE DISEÑO DE RED
•Cobertura
•Equipamiento
•Parámetros Técnicos
•Determinación de umbrales
Calculo de umbrales de potencia
Definición de radio de celda permitido por la perdida de camino
PLANEAMIENTO DE ZONAS
• Cobertura
• Disponibilidad de sitios
• Desarrollo del plan
• Perfil de crecimiento
• Regulación
Ubicación de las celdas
Análisis de cobertura por fase
Medidas de campo de problemas de los sitios
PLANEAMIENTO DE ZONAS
• Tráfico
• Equipo
• Parámetros técnicos
• Perfil de crecimiento
Análisis de tráfico por fase
Iteración de diseño
CRITERIOS DE DISEÑO DE REDES
• Regulación
Planeamiento de frecuencia por fase
Verificación de estrategia de crecimiento por fase
Confección de lista de sitios candidatos
Iteración de diseño
Equipo de adquisición de sitios
Verificación de ubicación de sitios:
-Cobertura
-Tráfico
-Interferencia
Sitios rechazados
Confección de lista Maestra de sitios
Medidas de campo de problemas de los sitios

Figura 2.5: Proceso de Planeamiento de Celdas.

Las tablas que siguen presentan un listado de la información más relevante a tener en cuenta en la planificación de redes inalámbricas.

Tipo de información	Parámetros
Planeamiento de zonas / áreas	Definición de zonas / ciudades Suposiciones de ambiente de propagación por zona Orden de prioridad por zona
Cobertura	Objetivos de cobertura por zona y ambiente Calidad de cobertura, requerimientos especiales
Trafico	Grado de Servicio Perfiles de abonado (mErl/Abonado) Densidad de abonado por zona Tipo de servicios (fax/teléfono/módem) Objetivo de penetración del servicio Objetivo de crecimiento Capacidad inicial de la red
Equipamiento	Configuración de las BS Configuración de abonados Costos del equipamiento Estructuras (mástiles, torres, monopolos) Capacidad de las BS
Otros criterios de diseño de red	Calidad de voz Taza de error (BER) requerida para datos Disponibilidad de radioenlaces Porcentaje del área de la celda perdida por interferencia
Marco regulatorio	Requerimiento de licencias Disponibilidad de espectro o limitaciones Planeamiento limitaciones de tamaño de construcciones y mástiles
Parámetros técnicos	Modelo de propagación Presupuesto de enlace Modelo de tráfico Margen de desvanecimiento Margen de sombra Otros márgenes
Desarrollo del plan	Número de sitios por zona planificada, según desarrollo e intervalo de crecimiento Configuración de sitios según crecimiento
Perfiles de crecimiento	Crecimiento de obertura por año o intervalo Crecimiento de tráfico y penetración por intervalo Estrategias de crecimiento Horizonte planificado
Disponibilidad de sitios	Conocimiento de dificultades de planeamiento Sitio existentes del propio operador Sitios fáciles de conseguir (convenios, públicos, etc.)
Datos de mapas	Especificación y disponibilidad de: - Información de datos del terreno - Datos de edificación por zona - Datos vectorizados de mapas

Tabla 2.2: Especificaciones de Diseño y Planeamiento de Radio

Tipo de información	Parámetros
Lista de sitios candidatos por fase	Identificación de sitio Nombre del sitio Coordenadas del sitio (latitud / longitud) Cota Fase Configuración (número de sectores, etc.) Configuración de la BS (capacidad, etc.) Nivel de potencia Tipo de antena, altura, orientación, polarización, inclinación (tilt).
Mapas	Area de búsqueda

Tabla 2.3: Lista de Sitios Candidatos

Tipo de información	Parámetros
Lista maestra de sitios por fase	Identificación de sitio Nombre del sitio Coordenadas del sitio (latitud / longitud) Cota Fase Configuración (número de sectores, etc.) Configuración de la BS (capacidad, etc.) Nivel de potencia Tipo de antena, altura, orientación, polarización, inclinación (tilt). Información adicional: - Dueño del mismo - Emplazamiento - Fotos - Reporte de reconocimiento del sitio, diagramas - Si es apropiado, medidas del sitio

Tabla 2.4: Lista Maestra de Sitios

El proceso de diseño involucra:

1) Diseño preliminar: Una vez identificada el área para brindar cobertura (por decisión económica o estratégica de mercadeo) se dispone una grilla de celdas y se estiman emplazamientos tentativos para las BS. Se verifica que las condiciones de cobertura y capacidad de tráfico cumplan con los objetivos de calidad de la empresa.

2) Planificación detallada de cada celda: Se analiza celda por celda el emplazamiento de la misma en el área a cubrir. Los radios de cobertura y posición de la BS dependen

de la distribución de tráfico, y de las condiciones de propagación radioeléctrica que caracterizan la zona de la celda.
3) Ubicación y procedimientos administrativos: Una vez definidos los sitios, deben ser procurados. De no ser posible implementar la BS en el sitio determinado en el proceso de diseño, se deberán realizar ajustes para contemplar su nuevo emplazamiento.

4) Construcción del sistema: Una vez obtenidos los sitios se instalan las BS y se inician sus pruebas de puesta en servicio.

5) Optimización del sistema: El proceso de diseño es posible en base a supuestos simplificadores sobre la propagación de radio, por lo que se deberá analizar el impacto de la nueva celda en el desempeño del sistema. Una vez operativa es posible realizar ajustes en la ecuación de presupuesto del enlace, y ajustar aspectos del diseño tomando en cuenta información real.

6) Operación comercial: Una vez instalada, verificada, y optimizada en el contexto del sistema, la celda entra en operación comercial.

2.*4.4 Diseño para Grado de Servicio y Probabilidad de Bloqueo en las Interfaces Celulares.*

Este punto contribuye al conocimiento de las técnicas de ingeniería de teletráfico que se aplican tanto en redes de telefonía fija como celulares. Su comprensión permite saber cuándo es válido aplicar este tipo de modelos de comportamiento a los usuarios de una red de telefonía. De allí su importancia.

2.4.4.1 1ra Fórmula de Erlang o Erlang-B

La primera fórmula de Erlang permite estimar el porcentaje de tráfico perdido en un conjunto de canales, en función del tráfico ofrecido (expresado en Erlang), y el número de canales de comunicación que se disponen. Los canales deberán ser igualmente disponibles para todos sus potenciales usuarios. Se asume como tráfico perdido aquél que resulta de intentos de llamadas fallidos porque no hay canales disponibles para su establecimiento. Este modelo estadístico no considera otras causas de no completamiento de las comunicaciones, tales como, el abonado llamado no contesta,

el abonado llamado está ocupado, etc.

Condiciones necesarias para su validez:

1. Infinitos usuarios originando llamadas (da resultados aceptables a partir de que el número de usuarios y el número de canales a ocupar guarden al menos una relación de 30 a 1). Esto quiere decir que el número de usuarios posibles en relación al número de canales que disponen tiene que ser muy alto para validez de la fórmula. Esta suposición es necesaria para que la probabilidad de que arribe una nueva llamada a los canales estudiados sea independiente del número de comunicaciones en curso, lo que significa que la probabilidad de establecimiento de una llamada es independiente de las que están en curso. La distribución de probabilidad que describe el conteo de llamadas en un intervalo de tiempo es la distribución de Poisson. El tráfico que se origina con distribución de Poisson es llamado “tráfico con chance pura”.
2. Equilibrio estadístico. Esta condición significa que la cantidad de canales ocupados en función del tiempo (matemáticamente hablando es un proceso estocástico) como proceso matemático debe ser estacionario. La fórmula se puede aplicar cuando la tasa de ocurrencia de llamadas y sus duraciones es tal que en sucesivos intervalos de tiempo el promedio de ocupación de canales, y la dispersión de dicho promedio, permanecen invariables.
3. Duración de llamada modelada por medio de una distribución de probabilidad exponencial negativa. Esto significa que, dado que las llamadas presentan una duración impredecible, ésta se puede modelar matemáticamente por medio de una variable aleatoria con distribución de probabilidad exponencial negativa. Esta distribución es la que se aplica al envejecimiento de los componentes electrónicos, y se traduce en que la probabilidad de que el proceso considerado dure T segundos a partir de un cierto instante, es independiente de cuánto ha transcurrido hasta el momento.
4. Las llamadas que no pueden cursarse por no haber disponibilidad de canales se pierden. Esto significa que las llamadas que no encuentran canales libres cuando se originan se pierden, y no son reintentadas. Si se reintentan se estarían produciendo llamadas nuevas dependientes de las que se cursaron. Esta hipótesis es realista cuando el grado de servicio de diseño es de muy bajo valor.

5. Cualquier canal libre, de los N disponibles en la expresión, puede ser alcanzado por una llamada entrante con igual probabilidad, no hay ni circuitos ni llamadas privilegiadas.

E1(N,Ao) es la probabilidad de que N canales, a los que se le ofrecen *Ao* Erlang, presenten congestión por falta de canales. Esta expresión es equivalente a calcular la probabilidad para que cuando se produzca una llamada la celda considerada tenga sus *N* canales ocupados. Es importante aclarar que si un instante después hay *N-1* canales ocupados, la llamada igualmente se perdió porque la red celular no puede retener una llamada en espera de que se liberen canales. La expresión *E1(N,Ao)* se puede calcular como se indica a continuación:

$$E_1(N, A_o) = \frac{A_o^N}{N!(\sum_{i=0}^{N} \frac{A_o^i}{i!})} \quad \text{o recursivamente} \quad E_1(N, A_o) = A_o \frac{E_1(N-1, A_o)}{N + A_o E_1(N-1, A_o)}$$

Con E_1 (0, A_0)=1 (que quiere decir que la probabilidad de pérdida en 0 canales es 100%), para iniciar la recursividad. E1(N,Ao) es la probabilidad de pérdida de comunicaciones en N canales ante un tráfico ofrecido de Ao Erlangs.
Esta fórmula puede ser evaluada numéricamente (empleando métodos de Cálculo Numérico) o se puede consultar tablas.

2.4.4.2 Fórmula de Engset
Se aplica a sistemas basados en que las llamadas que no encuentran canales se pierden, en que el número de usuarios guarda una relación inferior a 30 a 1 con el número de canales a ocupar. Puede aplicarse para determinar el grado de servicio de una interfaz radioeléctrica celular, cuando la relación entre el número de usuarios en el área de cobertura de una celda, y el número de canales en la misma, es inferior a 30 a 1. Puede ser más adecuada que Erlang-B para el dimensionamiento de microceldas y picoceldas.

No abordaremos su demostración dado que excede los objetivos de este trabajo.

- N: Nº de canales.
- M: Nº de potenciales usuarios.

- A: tráfico ofrecido, expresado en Erlang, por todas las fuentes.
- a: tasa de llamadas por dispositivo libre (se puede ver que la probabilidad de que na fuente de tráfico libre al inicio de un intervalo de duración diferencial haga una llamada durante el mismo es a multiplicado por la duración del intervalo).
- B es la probabilidad de que se pierda una llamada por no haber canales disponibles.

Para calcular a nos basaremos en que cada fuente de tráfico origina A/M Erlang, de los cuales (A/M)*(1-B) Erlang son cursados, por lo que se puede deducir que a la expresión *a* le corresponde la fórmula,

$$a = \frac{A}{M - A(1 - B)}.$$

Y a la probabilidad de pérdida, equivalente al grado de servicio del conjunto de canales, le corresponde la fórmula,

$$B = \frac{C_N^{M-1} a^N}{\sum_{r=0}^{N} C_r^{M-1} a^r} \quad \text{(Fórmula de Engset)}$$

La fórmula de Engset puede ser evaluada por métodos numéricos o a partir de tablas pre-calculadas.

Capítulo III

Estrategias de Adaptación de la Planificación de la Red Celular

En los módulos anteriores hemos analizado las distintas herramientas y elementos a tener en consideración para poder planificar adecuadamente una red celular. En el presente módulo pretendemos profundizar en algunos aspectos de la planificación y optimización de una red celular, cuando la misma va teniendo un mayor grado de madurez.

Tempranamente los sistemas de telefonía móviles operaban de modo similar a las emisoras de radio AM o FM comerciales en lo que a cobertura respecta, es decir, con transceptores de alta potencia se cubrían grandes áreas geográficas. En la medida que los sistemas evolucionaron y el número de suscriptores fue en aumento se dificultó enormemente implementar un sistema celular basado en Estaciones Bases (BS) de gran cobertura, fundamentalmente porque la demanda de tráfico rápidamente empezó a condicionar las áreas de cobertura, incidiendo en la potencia de transmisión de las BS.

La combinación de un limitado espectro de radiofrecuencia y un continuo incremento del número de suscriptores, ha llevado a que los operadores de redes hayan buscado formas de aumentar el número de canales que los mismos puedan ofrecer a sus clientes; el mecanismo que se ha encontrado es la reutilización de frecuencias. Por ejemplo, si no existiera el mecanismo de reutilización de frecuencias, que ya introdujimos en el Módulo 4 y ampliaremos en éste, en AMPS, con un ancho de banda total de 12,5 MHz para cada sentido dúplex, solo se podría cursar un máximo de 416 conversaciones simultáneas.

Las celdas celulares o BS pueden tener radios de cobertura que varían entre 1 y 50 Km., y usan frecuencias, en los sistemas FDMA y FDMA/TDMA, cuidadosamente elegidas de modo de reducir la interferencia con las celdas vecinas. El área atendida depende de la topografía, población y tráfico. Existen BS con cobertura sumamente reducida, para cubrir túneles, subterráneos y rutas.

Es posible aumentar la capacidad de una red celular aplicando una estructura jerárquica de celdas, basado en capas superpuestas en una misma área de servicio. Esto permite la coexistencia en una misma área geográfica de celdas de distintos tamaños (macro, micro y pico) cuyas áreas de cobertura pueden ser superpuestas.

3.1 Estructura Jerárquica de Celdas en una Red Celular

El plan de frecuencias resultante de dimensionar la red de acceso para cumplir los requerimientos de la planificación de redes celulares, resulta en un mapa de distribución de BS.

Las celdas, o sus respectivas áreas de cobertura, se superponen en capas, la de mayor nivel jerárquico es la macrocelda, que cubre grandes áreas; por debajo de ella se encuentra la capa correspondiente a las microceldas, que se encargan de manejar zonas abiertas de alta densidad de tráfico, tales como calles muy transitadas, con un menor radio de cobertura. Por último se encuentra la capa de picoceldas, que atienden el tráfico en locales cerrados, con un área de cobertura sumamente reducida.

La estructuración en capas de las celdas permite especializar la cobertura y capacidad de canales en lugares donde se concentra un gran número de usuarios, evitando así afectar el diseño para amplias áreas de cobertura que se realiza con macroceldas.

Las microceldas y picoceldas presentan áreas de cobertura muy reducidas debido a la baja potencia de emisión que se emplea en sus transmisores, y las antenas se instalan a baja altura, prácticamente a la altura de las MS; las microceldas se emplean, generalmente, para las aplicaciones descriptas en la siguiente Tabla.

Aplicaciones de microceldas	
Interiores (indoor)	**Exteriores (outdoor)**
Centro de convención	Cruces de vías de circulación de automóviles.
Estaciones de subterráneo	Túneles
Aeropuertos	Plazas
Hoteles	Áreas geográficas de cobertura dificultosa.
Estacionamientos	

Tabla 3.1: Aplicaciones de las Microceldas

Las picoceldas normalmente brindan servicio en espacios reducidos, generalmente dentro de edificios y estaciones de metro. Una de sus aplicaciones típicas es brindar cobertura en pisos altos de edificios, donde la calidad de la cobertura de las macroceldas es muy pobre por la interferencia.

Habitualmente la primera capa que se instala es la de, de modo de proveer cobertura en grandes áreas; y las pequeñas se instalan posteriormente para proveer capacidad de tráfico en lugares puntuales, en la medida que la demanda de tráfico crece. La siguiente figura 6 describe el concepto de capas superpuestas en la cobertura de celdas.

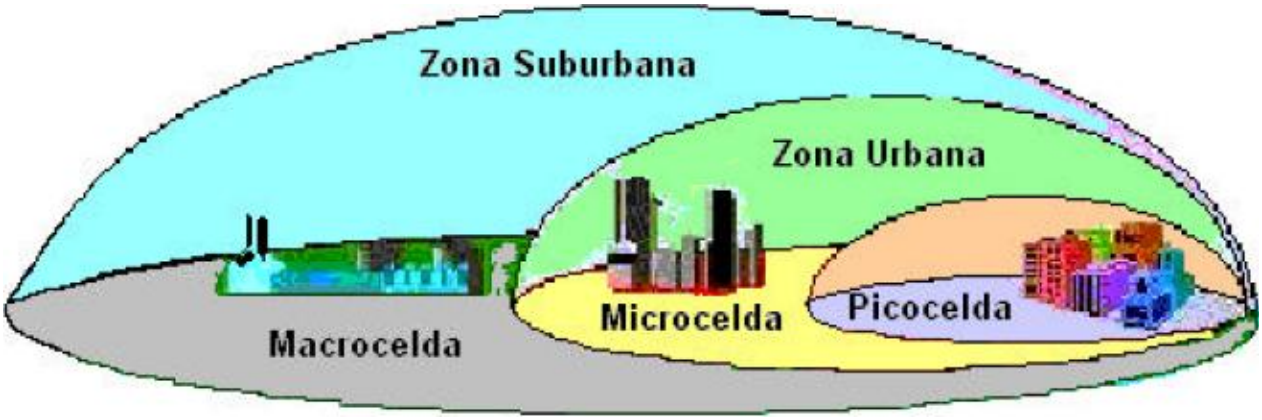


Figura 3.1: Coberturas superpuestas de Macroceldas, Microceldas y Picoceldas.

La configuración inicial de toda red celular, dado que se implementan básicamente macroceldas, se traduce, en mayor o menor medida, en las características que se enumeran a continuación:

- ✓ Pocos sitios donde se instalan BS. Los sitios son difíciles de conseguir por lo que esta condición facilita la implementación y posibilita una baja inversión en inicial en adquirir sitios.
- ✓ Altura importante de antenas para lograr mayor cobertura. Esto implica ó conseguir azoteas altas para emplazarlas, o levantar costosas torres o mástiles si no se dispone de edificios altos en la zona del sitio a implementar.
- ✓ Potencia alta de transmisión de los transceptores, tanto de la BS como de la MS debido al gran radio de cobertura.

- ✓ BS con antenas omnidireccionales, dado que no se justifica especializar la cobertura.
- ✓ Se implementan radios de cobertura amplios, de al menos varios kilómetros. Los mayores radios de cobertura son consecuencia de los tres puntos anteriores.

3.2 Técnicas para Mejorar la Capacidad de los Sistemas Celulares

Este módulo busca introducirnos en las principales acciones a emprender cuando se presenta la necesidad de ampliar la capacidad del servicio celular ante un aumento del tráfico de los usuarios.

Dicho incremento de tráfico puede ser:

- ✓ General y bastante homogéneo en toda la red, debido al crecimiento constante del uso del servicio celular. Debe estar previsto en una buena planificación. El crecimiento homogéneo generalmente resulta ó de campañas comerciales de captación de nuevos clientes con éxito, que suman su tráfico al existente en toda el área de servicio, o de modificaciones en las tarifas hacia la baja, si la elasticidad de la demanda de llamadas resulta de un uso dependiente de las tarifas.
- ✓ Focalizado en puntos de concentración de tráfico (hot spots o puntos calientes). Tal es el caso de nuevos centros comerciales, estacionamientos, estaciones ferroviarias o de metro.

Por otra parte, se debe distinguir el ámbito geográfico en donde se producen los problemas de congestión:

- ✓ Zonas densamente urbanizadas con alta concentración de edificios.
- ✓ Zonas suburbanas, distinguiéndose por el tamaño de las poblaciones.
- ✓ Zonas rurales, donde la telefonía celular puede acceder a abonados tanto para voz como para datos. Muchos de estos abonados son de carácter fijo, es decir, emplean terminales fijos con antenas de gran ganancia. Se les brinda el servicio de telefonía por medio de la red celular porque por su ubicación no podrían ser atendidos por una red basada en pares metálicos o fibra óptica. La cobertura de los sistemas de bucle de abonado inalámbrico generalmente es reducida, dificultando su aplicación en zonas rurales.

Veremos más adelante que a éste problema, se agrega la introducción de servicios de transmisión de datos de mayor ancho de banda.

Las medidas a adoptar pueden ser alguna de las siguientes (individualmente o combinadas):

- ✓ Aumentar el número de transceptores de las celdas con congestión. Siempre que sea compatible con el plan de frecuencias implementado.
- ✓ Emprender la digitalización de la red si el sistema existente es analógico, es el caso de redes celulares AMPS que pasan a D-AMPS. También puede considerarse el cambio del sistema digital implementado por otro con mayor eficiencia en el uso del espectro, tal podría ser el caso de pasar de D-AMPS a CDMA-One. Los transceptores digitales permiten utilizar cada portadora de radio en forma compartida, por medio de su estructuración en intervalos de tiempo. La capacidad de cada portadora implementada en el plan de frecuencias se multiplica por el número de canales TDMA o CDMA que se pueden implementar. La digitalización de la red también implica la digitalización de los terminales, de nada sirve introducir una nueva tecnología en la red celular si los terminales no la pueden utilizar.
- ✓ Sectorización de celdas (cell sectoring). Esto puede dar lugar a ineficiencia en los entroncamientos, dado que el conjunto de los sectores, con el mismo número de transceptores de la celda omnidireccional e iguales condiciones de grado de servicio, podrá cursar menos tráfico.
- ✓ Cambio de paso de clusters (conglomerados de BS), es decir, la reducción de la distancia entre BS (división de celdas o cell splitting).

En cada una de estas acciones se deben considerar las inversiones involucradas, el impacto en el mercadeo de servicios (plan de digitalización de terminales por ejemplo), técnicas (sí el equipo llegó o no a su máxima capacidad, limitación de espacio en laBS, etc.), del estado de evolución de la red, etc.

3.2.1 Técnicas de División de Celdas (Cell Splitting)

Cuando un área de servicio es afectada por una importante concentración de usuarios, o la demanda de tráfico de los usuarios aumenta considerablemente, se puede

proceder a partir el área de cobertura de las celdas en áreas más pequeñas. De esta manera los centros urbanos, lugar de alta concentración de usuarios, se pueden partir en tantas áreas como sea necesario para proporcionar una disponibilidad de canales de tráfico adecuada en regiones de tráfico pesado.

Nos podemos preguntar por qué partir las celdas puede aumentar la capacidad del sistema celular en un área en particular. La respuesta surge de analizar, tal como lo hicimos en el módulo anterior, la reutilización de frecuencias. En un área particular la utilización de conglomerados de celdas, resultantes del patrón de reutilización empleado el radio de cobertura definido en cada celda, reutilizará un mismo conjunto de canales y portadoras tantas veces como se puedan repetir en las celdas que cubren el área. Para evitar la interferencia co-canal dos reutilizaciones de un mismo grupo de canales y portadoras se deberá producir al menos a la distancia de reutilización *D* que corresponde al patrón. Para aumentar el número de reutilizaciones de los canales en una misma área es imprescindible disminuir D, recordemos del módulo anterior $D = [3KR]^{1/2}$. Disminuir D se puede lograr disminuyendo K, lo que no es posible sin cambiar la tecnología dado que depende de la relación C/I soportada, o disminuir R, lo que quiere decir disminuir el radio de cobertura original de las celdas, partiendo el área de cobertura de cada una de ellas en áreas de cobertura menores; esto es lo que logra la división de celdas.

Para cubrir regiones rurales alejadas, donde el tráfico cursado es menor, se utilizan las celdas grandes, de gran radio de cobertura, las cuales resultan menos costosas con relación al área cubierta.

En telefonía celular moderna, las regiones rurales y urbanas se dividen en áreas según pautas diferentes de diseño. Dichas pautas, tales como, la cantidad de celdas, su configuración (omnidireccional o sectorizada), la potencia de irradiación, el tamaño de sus áreas de cobertura, etc., son determinadas por los ingenieros que planifican la arquitectura celular del sistema.
Para cada tipo de región se desarrolla el plan de ingeniería más apropiado, pero todos tendrán en común la agrupación de celdas en conglomerados (clusters), la reutilización de las frecuencias, y la necesidad de solapamientos de cobertura para posibilitar los

traspasos. Como ya vimos, dentro de un mismo conglomerado no se reutiliza ningún canal.

El número de celdas de cada conglomerado está dado por el plan de frecuencias utilizado, pero el tamaño de los conglomerados está relacionado con las características de tráfico de la zona. Dicho tamaño define la llamada grilla (grid) de la zona. Se trata de una malla que define la ubicación teórica de las celdas, que luego se buscará llevar a la práctica intentando adquirir sitios concretos lo más próximo posibles a los teóricos.

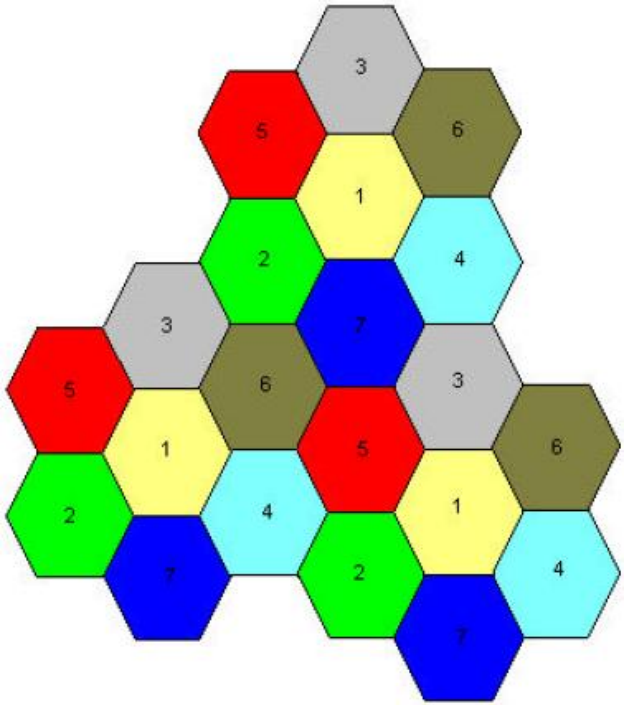


Figura 3.2: Esquema de tres conglomerado de una red con factor de reutilización K = 7.

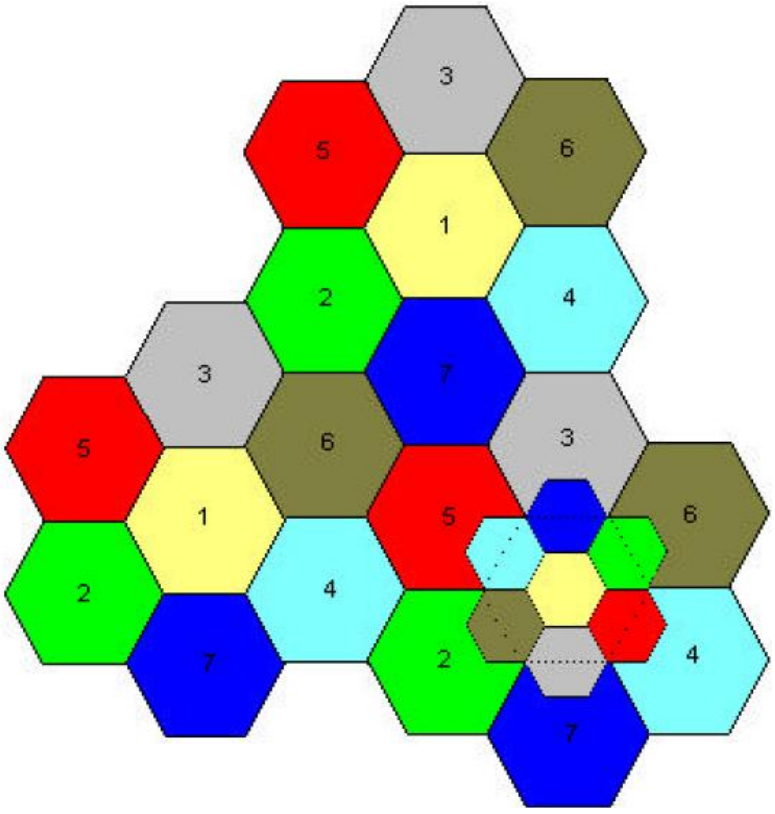


Figura 3.3: Esquema de la misma red donde se ha realizado un proceso de división de celdas.

La técnica de división de celdas busca disminuir el tamaño de las celdas grandes, transformándolas en múltiples pequeñas. Con la reducción del tamaño de las celdas, más celdas por área estarán disponibles, con el consecuente incremento en el número de canales, y por lo tanto de capacidad de tráfico.

La División de Celdas generalmente tiene lugar en el centro de un área de congestión.

- ✓ Los pasos a seguir para realizar dicho proceso son los siguientes:
- ✓ Reducción de la potencia de irradiación de la celda a ser dividida.
- ✓ Adición de nuevas celdas a la mitad de la distancia entre la celda dividida y las celdas circundantes (sí la división va a resultar en reducir el radio a la mitad).
- ✓ Asignación al conglomerado nuevo de los grupos de frecuencia de los conglomerados originales, pero aplicando una rotación. En el ejemplo de la Figura 3.3 se aplicó una rotación de 180º respecto a la asignación de frecuencias de los conglomerados originales. De esta forma solo se dan dos casos de

canales adyacentes. Los mismos se producen entre la celda grande 4 y la pequeña 5, y entre la celda grande 5 y la pequeña 4.

Lo que normalmente no se menciona en los libros, es la dificultad práctica que enfrenta un operador de lograr en tiempo y forma sitios concretos para localizar las 6 nuevas celdas rodeando la que se pretende dividir. Cada sitio nuevo implica el alquiler de una azotea o la compra de un terreno y la instalación de una estructura en él.

En resumen, la división de celdas toma celdas grandes y las divide en pequeñas, si son de muy pequeño radio las llamaremos microceldas, o si no serán consideradas macroceldas de menor radio de cobertura. La ventaja más importante desde el punto de vista de la planificación de la red es el permitir un crecimiento ordenado de la misma manteniendo el patrón de reutilización previsto.

Potenciales problemas:

- ✓ Se requiere el control de potencia en las MS para minimizar la interferencia cocanal.
- ✓ Puede ser necesario darle a las antenas de la BS inclinación (down tilting) para que sus señales no alcancen celdas con frecuencias co-canales. Este punto implica que es conveniente prever la instalación de dispositivos mecánicos para proporcionar inclinación cuando se instalan las antenas.

Las Figuras 3.4 a 3.6 permiten visualizar el efecto de los dispositivos de inclinación mecánica en los patrones de irradiación de una antena tipo sectorizada.

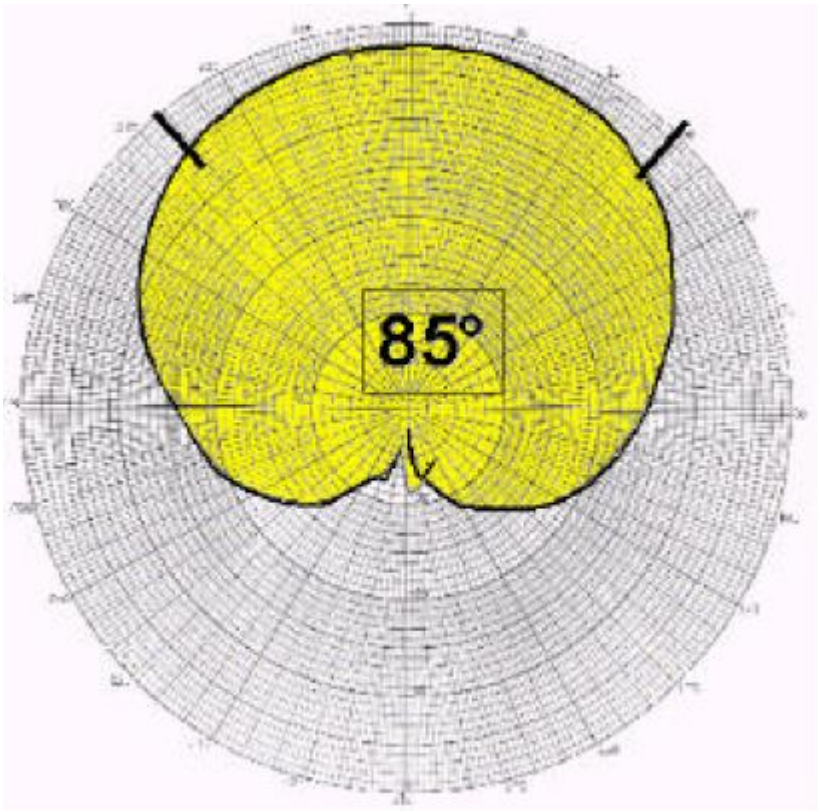


Figura 3.4: Patrón de irradiación de una antena de 85º de apertura horizontal sin inclinación mecánica.

Figura 3.5: Efecto de 7º de inclinación mecánica sobre el patrón de una antena de 85º de apertura horizontal.

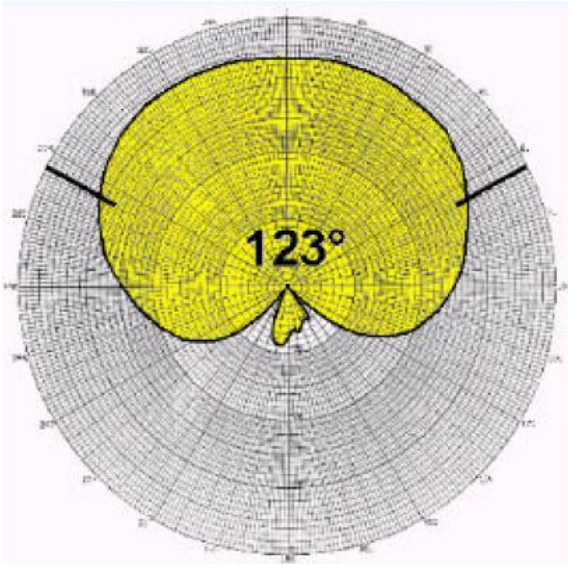


Figura 3.6: Efecto de 15º de inclinación mecánica sobre el patrón de una antena de 85º de apertura horizontal.

- ✓ Son más frecuentes los procesos de traspaso (handoff o handover) entre celdas. En un mismo recorrido el número de traspasos se ve incrementado, respecto a los que ocurrían antes de la división, ya que una vez divididas las celdas el suscriptor pasará por mayor cantidad de zonas de menor cobertura. En las Figuras 3.7 y 3.8 se puede visualizar, para su comprensión, la situación mencionada.

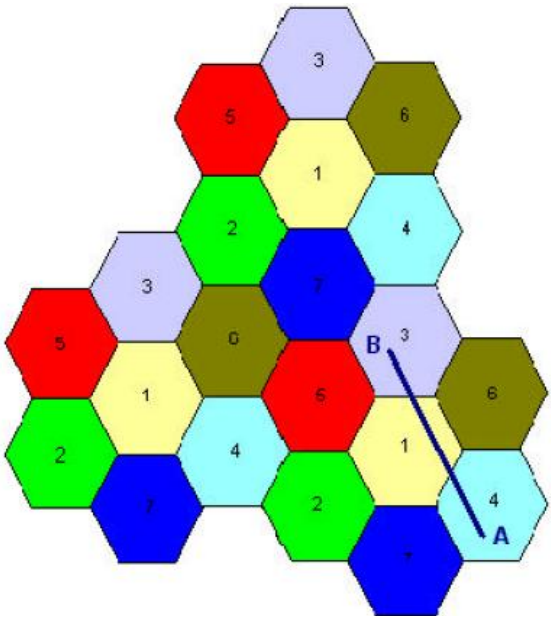


Figura 3.7: Pasaje del punto A al punto B a través de tres celdas mediante dos traspasos.

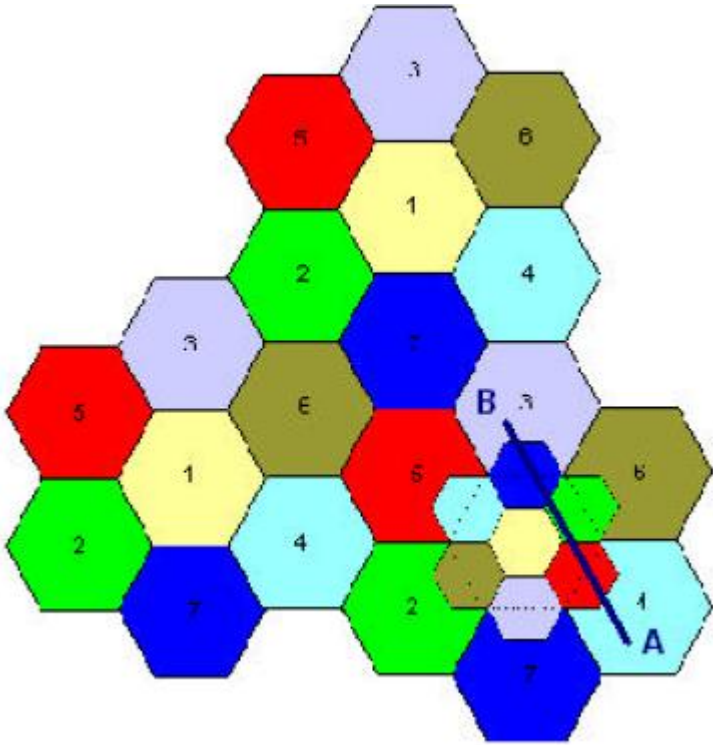


Figura 3.8: Pasaje del punto A al punto B (mismos puntos de la Figura 7) a través de cinco celdas y cuatro traspasos.

Todas estas modificaciones de las instalaciones de exterior (outdoor) implican posteriores e intensos procesos de optimización, para lo cual se debe estar preparado.

Al reemplazar transceptores de alta potencia por muchos transceptores de baja potencia, el mismo canal puede ser reutilizado según un patrón consistente pero a menor escala, evitando interferencias.

La potencia de los trasceptores varía dependiendo del fabricante y de la tecnología empleada, pero se puede decir que varían en el rango de los 50 Watts a 0.1 Watts.

La potencia efectiva irradiada también depende del largo de los cables tendidos entre la antena y los equipos de radio por la atenuación correspondiente a los mismos, así como de los conectores, combinadores, etc. La misma puede variar desde 55.4 dBm para radiobases de tipo macro (para macroceldas) a 22 dBm en las de tipo pico (para picoceldas).

Debemos recordar que a mayor frecuencia de trabajo mayores serán las perdidas, y que la potencia expresada en dBm es 10 veces el logaritmo decimal (en base 10) de la potencia expresada en Watts multiplicada por un factor 1000, es decir:

$$P \text{ (en dBm)} = 10.\log_{10} (P \text{ (en Watts)}. 1000)$$

Teniendo en cuenta, por ejemplo, que:

$$30 \text{ dBm} = 10.\log_{10} (1 \text{ Watt}.1000)$$

y que:

$$33 \text{ dBm} = 10.\log_{10} (2 \text{ Watts}.1000)$$

Por lo que se verifica que duplicando la potencia expresada en Watts, se incrementan en 3 dB (30 dBm + 3 dB = 33 dBm) las potencias irradiadas expresadas en dBm.

Las pérdidas por atenuación en los cables, asumen típicamente los siguientes valores en función de la distancia:

Atenuaciones en dB/100m	800 MHz	900 MHz	1800 MHz	1900 MHz
Cable coaxial (feeder) 7/8"	3.7	4.2	5.9	6.1
Cable coaxial (feeder) 1 ¼"	2.9	3.1	4.6	4.8
Cable coaxial (feeder) 1 5/8"	2.2	2.3	3.6	3.7
Cable coaxial (jumper) de ½"	----------	0.07 a 0.2	0.1 a 0.3	----------

3.2.2 Sectorización de Celdas (cell sectoring)

Para una celda con un número dado de canales la configuración omnidireccional de la misma es la que más rinde desde el punto de vista del manejo de tráfico, por la denominada eficiencia en entroncamientos que estudiamos en el módulo anterior. Por ejemplo: una radiobase omnidireccional de 12 canales puede cursar 6,61 Erlangs para una pérdida del 2% (probabilidad de bloqueo). En cambio si la partimos en tres, es decir que la configuramos con tres sectores, cada uno de los cuales con 4 canales, podrá manejar un tráfico de 1,09 Erlangs por sector, es decir un total de 3,27 Erlangs en toda la radiobase con igual número de transceptores y más antenas.

A pesar de reducir la capacidad de manejo de tráfico, es conveniente la división de la celda en varios sectores (generalmente 3 de 120º de apertura en el plano horizontal) por varios aspectos:

- ✓ Para reducir el número K de radiobases de cada conglomerado.
- ✓ Para mejorar la relación señal interferencia C/I, aun manteniendo K cte.

- ✓ Para disponer de una red con una distribución de tráfico más controlada.
- ✓ Para reducir la interferencia en zonas frontera entre celdas grandes y celdas pequeñas.
- ✓ Para mejorar la densidad de reutilización, es decir, que la misma frecuencia puede volver a usarse a una distancia menor, ya que los conglomerados van a ser de menor superficie, permitiendo mejorar la disponibilidad de canales en una misma área, de la misma forma que estudiamos para la división de celdas.
- ✓ Para reducir la interferencia co-canal.
- ✓ Las antenas poseen más ganancia (del orden de 5 dB superior a las antenas omnidireccionales), porque tienen que ser más sensibles a menor señal.

Como puntos en contra de la sectorización enumeramos:

- ✓ La red celular toma un carácter más complejo.
- ✓ Se recarga el procesamiento de traspasos, debido a que a los requerimientos de traspaso interceldas se le agregan los de traspaso intraceldas (traspaso entre un sector y otro de la misma celda).
- ✓ Aumentan los costos por la acción de sectorización.
- ✓ Se necesitan más antenas.

Respecto a la reducción de la interferencia a causa de la sectorización de las radiobases, por medio de las figuras de 3.9 a 3.12 ejemplificaremos tal aspecto.

Figura 3.9: Interferencia en el enlace descendente (downlink) (BS sobre MS) para conglomerados con K=7 y celdas omnidireccionales.

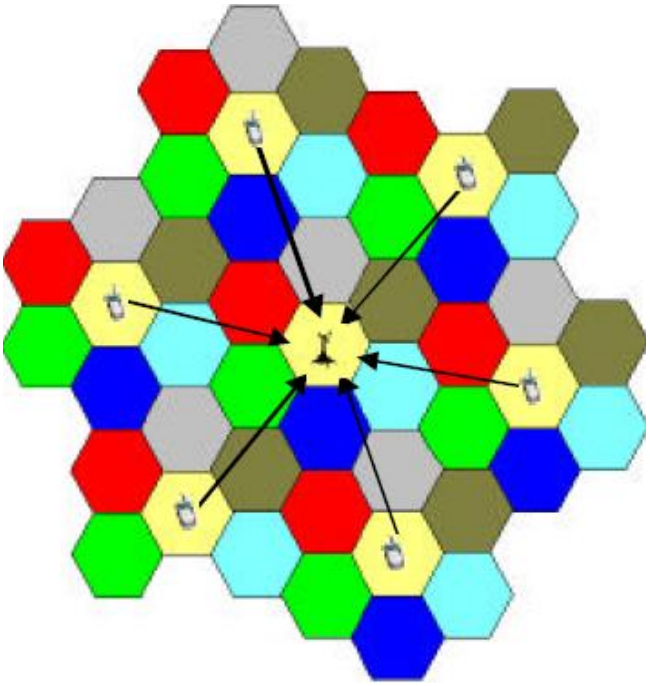


Figura 3.10: Interferencia en el enlace ascendente (uplink) (MS sobre BS) para conglomerados con K=7 y celdas omnidireccionales.

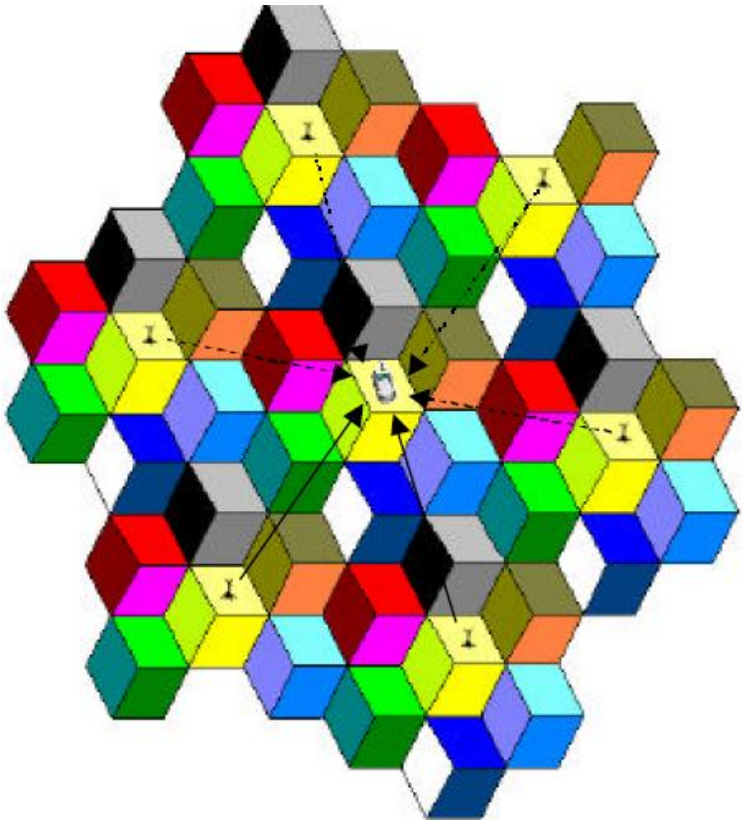


Figura 3.11: Interferencia en el enlace descendente (downlink) (BS sobre MS) para conglomerados con K=3x7 y celdas sectorizadas (7 grupos de canales en tres sectores por grupo).

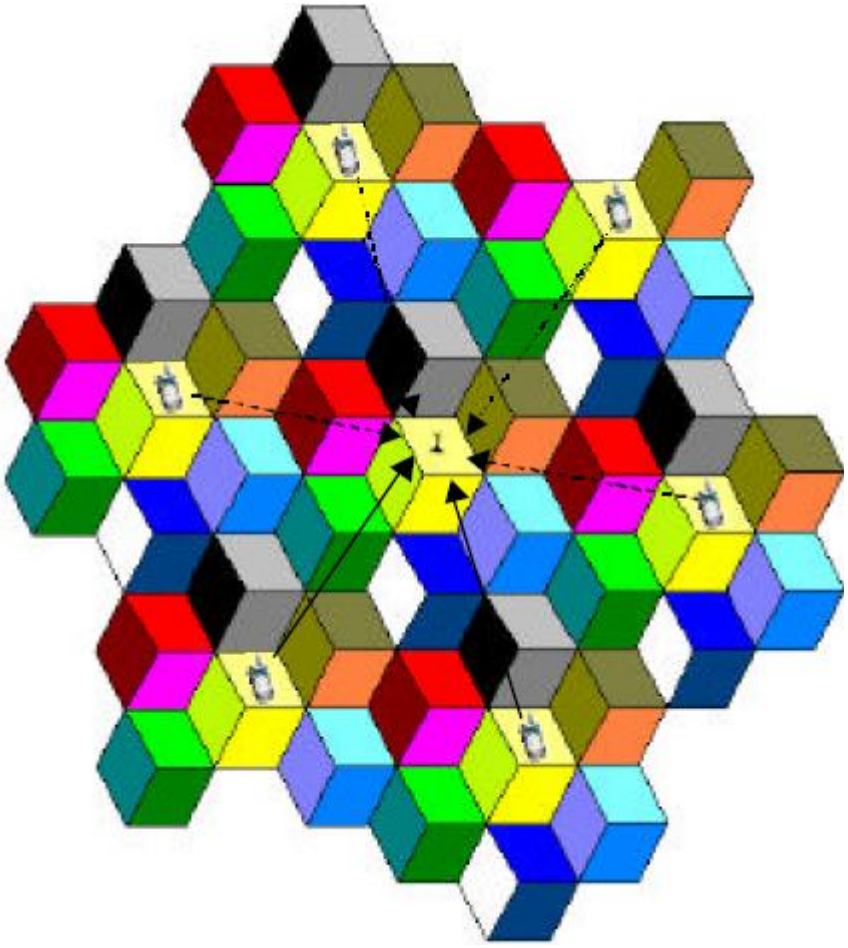


Figura 3.12: Interferencia en el enlace ascendente (uplink) (MS sobre BS) para conglomerados con K=3x7 y celdas sectorizadas.

La sustitución de antenas omnidireccionales por antenas direccionales permite la reducción de interferencia, por la directividad de las antenas utilizadas en las BS sectorizadas.

Pasamos, tanto en el enlace descendente (downlink) como en el ascendente (uplink), de tener 6 focos de interferencia fuertes e iguales, en el caso de celdas de tipo omnidireccional, a tener 2 focos muy débiles, 2 focos débiles y otros 2 más importantes, pero sustancialmente menores que en el caso omnidireccional, al sectorizar las celdas.

A modo de ejemplo analizamos las características de directividad de las antenas, tanto en el plano horizontal como vertical, estudiando sus patrones de irradiación en la Figura 3.13 para el caso particular de una antena sectorizada 120º.

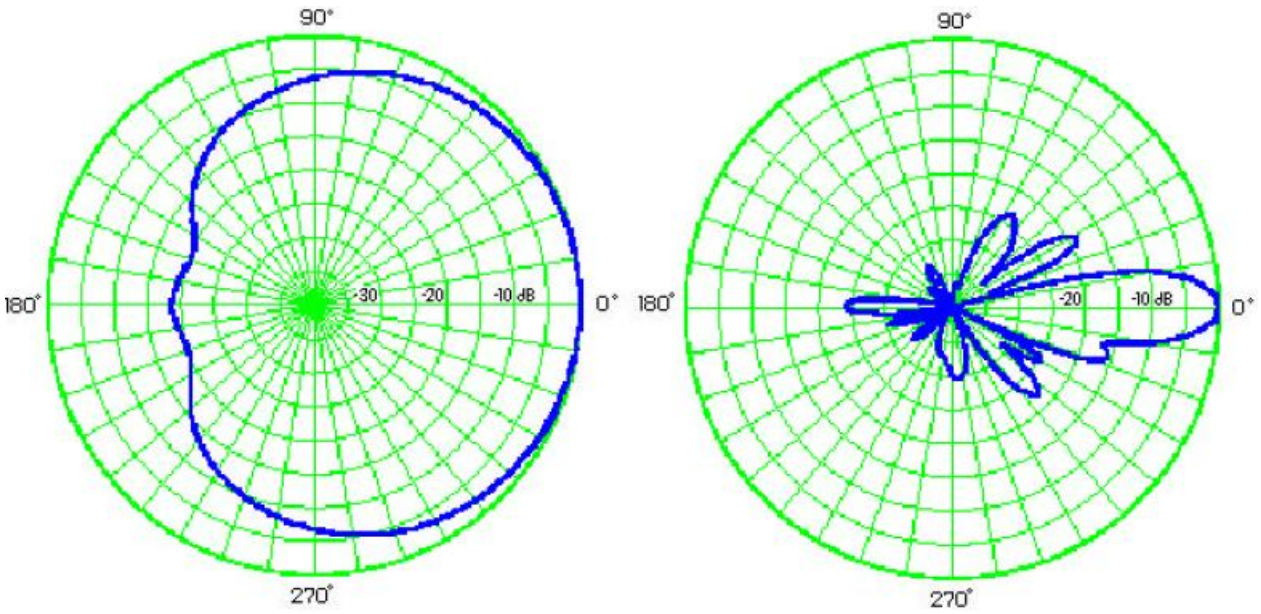


Figura 3.13: Patrón de antena 120^0 de apertura horizontal y 11^0 de apertura vertical.

En las antenas sectorizadas resulta importante conocer la relación de potencia frente a espalda, que significa conocer el cociente de la potencia en el lóbulo principal hacia el sector a cubrir y el correspondiente a la misma dirección pero en sentido opuesto, tal cociente debería resultar en infinito si la antena fuera ideal. La señal que la antena irradia en dirección opuesta al sector que atiende deberá ser tan pequeña como sea posible para minimizar su impacto en la interferencia co-canal.

3.2.3 Múltiples Niveles de Cobertura

La eficiencia de una banda de frecuencias puede ser mejorada introduciendo los múltiples niveles de cobertura o multicapas, descriptas en el punto 3.1 de éste capítulo; de modo de incrementar la capacidad de la interfaz de radio. Esta forma de diseño implica que físicamente las áreas de cobertura de las radiobases se solapan, o que las frecuencias (transceptores) son utilizadas solo en determinadas zonas del área de cobertura de la radiobase.

Cuando las áreas de cobertura se solapan y son usadas en diferentes radiobases, estas son llamadas macro o micro celda basado en el tamaño de su área de cobertura. Dicha área depende fundamentalmente de la altura de las antenas.

Cuando una determinada frecuencia es usada no homogéneamente en el área de cobertura de la BS, la frecuencia es denominada frecuencia superior (overlay) si puede ser usada en toda el área de cobertura, y frecuencia subordinada (underlay) si puede ser usada solamente muy cerca de la BS cuando la relación C/I es aceptable. Esta última puede ser llamada también microcapa o subcapa de microcelda.

- *Configuración superior/subordinado (overlay/underlay)*

Es una configuración que permite que dos celdas sean definidas en la misma BS. La celda subordinada tiene menos potencia y menor cobertura, y provee servicio al MS cercano a la misma; mientras que la celda superior tiene mayor potencia y más amplia cobertura, y provee servicio a las MS más alejadas del sitio.

La celda superior contiene canales de voz, de control, y dispositivos de localización. La celda subordinada contiene solo un grupo de canales de voz y depende de la superior respecto a las condiciones de traspaso.

La principal ventaja de esta solución es incrementar la capacidad de manejo de tráfico de una celda sin tener que buscar nuevos sitios para BS, con las dificultades que esta tarea conlleva. También evita requerimientos adicionales de transmisión, entre celdas con pequeño radio de cobertura y otras con gran radio, evitando así mayores inversiones en implementar o arrendar la red de transporte.

Esta solución se potencia cuando la celda superior se ubica donde la concentración de tráfico es importante, como ser plazas concurridas, peatonales, etc. La Figura 3.14 muestra distintos ejemplos de configuración posibles.

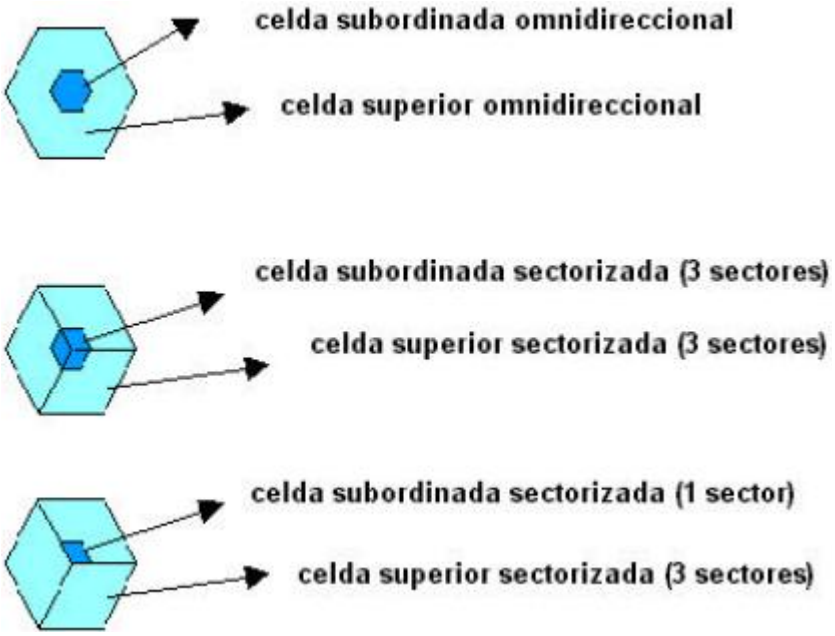


Figura 3.14: Ejemplos de configuración de celdas superior/subordinada (overlay/underlay) omnidireccionales y sectorizadas.

Una técnica de uso común en redes celulares es el llamado préstamo o traslado de canales. Por esta técnica se pueden asignar canales de una celda, que se encuentra cursando tráfico holgadamente, a otra que se encuentra congestionada. En estos casos se debe prestar especial atención a que los canales adyacentes, o los cocanales, pueden estar más próximos de lo que el patrón de reutilización determina.

Por lo tanto debe verificarse, por medio de medidas en campo, que la relación portadora a interferencia (C/I) para dichos canales esté dentro de los límites aceptables para la tecnología empleada. Por ejemplo, para AMPS e IS-136 se requiere por lo menos 18 dB de relación C/I, para GSM se requiere por lo menos 9 dB como resultado de la combinación de la técnica FDMA con un salto de frecuencias lento en las portadoras. Cuando el tráfico en una BS se concentra próximo a su ubicación, se puede utilizar el llamado préstamo de canales para lograr capacidad adicional.

La interferencia ocasionada por el préstamo puede ser reducida cuando los canales prestados son ajustados a menor potencia, y así dedicarlos a atender la zona más próxima a la BS.

Un usuario que se desplaza alejándose de la BS, sobre el radio de la celda, pasará desde el nivel interno al externo. Por el contrario, una MS que se mueva hacia la BS, sobre el radio de la celda, pasará desde el nivel externo al interno.

Mediante el llamado traspaso forzado (forced handoff), se pasan llamadas hacia arriba o hacia abajo. Se deben hacer intervenir algoritmos de soporte lógico (software) que analizan la potencial interferencia de los canales antes de asignarlos.

3.2.4 Traspaso Forzado (Forced Handoff)

Tal como se expuso en el capítulo 1, cuando un usuario cruza la línea entre dos celdas adyacentes mientras está establecida una llamada, debido al uso de diferentes canales de radio, se debe transferir la llamada de un canal de radio a otro. Este proceso es denominado traspaso (handoff o handover como definimos en el Módulo 1), y normalmente se produce cuando la recepción se hace débil, la potencia recibida baja por debajo de un cierto umbral, y aumenta la interferencia por el alejamiento MS y BS.

Sin embargo pueden producirse problemas cuando la MS requiere traspaso, y las BS vecinas están momentáneamente con su capacidad completa, es decir, no poseen canales libres. En estas condiciones la llamada caerá y pasará a sumar a la estadística de traspaso fallido. Para reducir estos problemas han sido creados otros procedimientos de traspaso como el Traspaso Asistido por el Móvil (Mobile Assisted Handoff o MAHO) y el Traspaso Blando (Soft Handoff/Soft Handover).

Un traspaso se dice forzado cuando el mismo debería darse pero se evita que ocurra, o no debería darse y es obligado a que ocurra. La decisión de forzar un traspaso es tomada por el sistema celular. El control del proceso de traspaso se puede realizar asignando:

- ✓ Un bajo umbral de traspaso en una celda en la que se pretende mantener la MS aún en zonas de menor potencia de cobertura. Entenderemos por umbral el nivel de potencia para el cual se decidirá iniciar el proceso de traspaso.
- ✓ Un alto umbral de traspaso en una celda en la que se pretende que las MS algo alejadas de la BS pasen a las celdas adyacentes.

El mencionado control puede realizarlo la MSC, al recibir el pedido de la BS, y darle lugar prontamente o lentamente; o la MSC puede crear un traspaso aún cuando no le sea solicitado por la BS que está sirviendo a la MS.

Si la MSC encuentra que hay celdas congestionadas y otras holgadas, puede solicitar a la celda congestionada que disminuya temporariamente su radio de cobertura efectivo pidiendo que fuerce traspasos, así podrá ofrecer todos sus canales a los móviles más cercanos a la BS, aumentando su capacidad de tráfico en la zona cercana a la BS. Esto lo realiza el MSC/BSC ordenándole a la celda que suba su umbral de traspaso.

- *Traspaso Asistido por el Móvil (Mobile Assisted Handoff o MAHO).*

En AMPS, D-AMPS y en general en TDMA, existe el mecanismo de traspaso asistido por el móvil. Para ello el mismo mide C/I (relación señal a interferencia) o RSSI (indicador de potencia de la señal recibida) según el caso.

En GSM, por ejemplo, la MS realiza estadísticas respecto a la BS más conveniente para servirle, para hacer más efectivo el traspaso. La MS hace medidas del nivel de señal recibida desde las BS circundantes y las envía a la red. La red usa estos valores, y otros como el número de canales libres en otras BS, para que tomar la decisión, con abundante información, acerca de a qué BS debe transferir la llamada.

El proceso de traspaso puede ser solicitado tanto por la MS como por el MSC. El MS busca los canales de control de las BS vecinas, creando una lista con los mejores candidatos para el posible traspaso, basado en la potencia de la señal recibida (RSS) Esta información es pasada a la BSC(1) y al MSC, y es usada en el algoritmo para decidir el traspaso.

Se habla de *traspaso interno (internal handover),* cuando involucra solamente al propio BSC, y de *traspaso externo (external handover)* cuando es manejado por el MSC para celdas bajo el control de diferentes BSC, pero del mismo MSC, o para celdas bajo el control de diferentes MSC.

- *Traspaso Blando (Soft Handover)*

En CDMA se usa un proceso similar al MAHO, excepto por que la primera BS, que está dejando de servir a la MS, no se deshace de la llamada hasta que la segunda BS confirme que ha recibido la misma. Cuando la confirmación de que el traspaso se ha completado llega desde la segunda BS, la primera BS libera la llamada. Este proceso trae como consecuencia la reducción del índice de llamadas caídas y mejora en la tasa de error de bits en el canal de tráfico (BER) por lo que redunda en una mejora en la calidad del servicio.

- *Control de Potencia (Power Control)*

El control de potencia procura reducir el consumo de energía de los terminales, y también la interferencia que se produce. Ambos, tanto MS como BS, operan con el más bajo nivel de potencia que permite mantener una aceptable calidad de señal. La MS mide la potencia o la calidad de la señal y decide (o lo hace la BSC en caso de existir) el cambio de nivel de potencia y el momento en el cual hacerlo. Las normas de la interfaz de aire en los distintos sistemas prevén los distintos niveles de potencia a ser manejados según el tipo de MS.

3.2.5 Comentarios Finales sobre las Técnicas para Ampliar la Capacidad y de Planificación en general

Resulta fundamental disponer de información fidedigna y actualizada sobre los requerimientos de tráfico de los suscriptores. Por esta razón, una vez puesta en servicio la red, es imprescindible realizar informes periódicos sobre la utilización de los canales en las distintas celdas de la red de acceso, y cotejar si el tráfico cursado es consistente con un tráfico ofrecido en las condiciones de grado de servicio consideradas para el diseño. La medición del tráfico cursado es lo único que nos permite conocer qué tan bien se está atendiendo el tráfico ofrecido, aunque también pueden contribuir otros reportes estadísticos, tales como porcentaje de llamadas rechazadas a nivel del canal de control de cada celda por falta de canales, porcentaje de llamadas y celdas involucradas en procesos de traspaso fallido, etc.

Se debe tener especial cuidado en lograr el trabajo coordinado entre el personal de mercadeo y el personal técnico. Esto permitirá que no existan desfasajes entre el

lanzamiento de los diferentes planes comerciales, cambios de tarifas, promociones, y lanzamientos de nuevos servicios, y las previsiones realizadas en la planificación del crecimiento de la red, tanto del punto de vista del tráfico vocal como del tráfico de datos.

Aspectos relacionados con distintas modalidades de fraude y de las diferentes formas de facturación se analizarán en el próximo módulo.

Las diferentes operadoras tienen la necesidad de defenderse de todas las variantes de fraudes y ataques de delincuentes informáticos (hackers), así como de poder facturar de acuerdo a los muchos tipos de servicios ofrecidos (prepagos, postpagos, tarifa plana, cobro por mensaje, cobro por volumen de información, etc.

Esto lleva a que la planificación de la red no solo debe considerar aspectos de ampliación de cobertura y capacidad de la red, sino también la adquisición y actualización de distintas plataformas (de protección (firewalls), de facturación (billing), de autenticación (AuC), de reconocimiento de registros (EIR), etc.).

Para encaminar más exitosamente la planificación del despliegue de sistemas de acceso inalámbrico, se requiere el conocimiento y entendimiento de tres áreas diferentes:

- ✓ El plan de negocios y la base considerada de clientes/suscriptores.
- ✓ Un sólido conocimiento demográfico y topográfico de las áreas donde el servicio es provisto.
- ✓ Un relevante conocimiento de ingeniería de radio, experiencia y habilidad.

Estas áreas de información requeridas involucran tres diferentes grupos de habilidades y conocimientos. Casi invariablemente, el acceso a la información y pericia necesaria requerirá al menos tres diferentes individuos. Es importante que esos tres individuos trabajen efectivamente juntos, de modo que la información, conocimiento y experiencia de cada uno se complementen y alcancen la más exitosa solución.

El proceso de planificación del despliegue es una actividad interactiva e iterativa. Es apropiado y necesario trabajar progresivamente mediante varias soluciones tentativas, con cada una de las cuales se vaya mejorando el resultado global, hasta alcanzar la solución óptima y acordada.

Capítulo IV

Asignación de Frecuencias en Telefonía Móvil 3G

Introducción

La licencia de explotación del espectro radioeléctrico es uno de los principales costos que debe soportar un operador de telefonía móvil. En estos casos, la reducción del número de frecuencias en el diseño de una red puede suponer un ahorro considerable. Igualmente, una vez contratada la licencia y determinado el número máximo de frecuencias disponibles, la capacidad de tráfico de la red puede ser incrementada mediante un mejor aprovechamiento del espectro, en el sentido de reutilizar frecuencias en distintas celdas de la red y poder transmitir simultáneamente desde distintos puntos con una misma portadora.

Una red de telefonía móvil celular se compone de una serie de celdas que pueden interferirse recíprocamente según distintos factores de proximidad, potencia de emisión o densidad de tráfico. La relación de interferencia entre las celdas permite modelar la red a través de un grafo, correspondiéndose los vértices con celdas (o las estaciones base que dominan cada celda) y designando las aristas la relación de interferencia entre celdas o vértices. De este modo el problema de asignación de frecuencias puede considerarse desde el punto de vista del coloreado de grafos y resolverse a partir de los métodos algorítmicos descritos en los siguientes capítulos.

En el presente capítulo se describe el funcionamiento de una red celular GSM, el problema derivado de la asignación frecuencial y la definición de diferentes especificaciones (matrices y vectores) para la resolución de dicho problema. Finalmente se explica su representación en términos de la teoría de grafos.

4.1 Sistema GSM

El sistema GSM de telefonía móvil celular debe sus siglas al Group Spéciale Mobile creado en 1980 con el objeto de definir y especificar un sistema de cobertura paneuropea (y naturaleza digital), capaz de dar servicio a un gran número de abonados y que pudiera integrarse fácilmente en las nuevas redes de telecomunicación RDSI.

Este grupo inició sus trabajos en el año 1985 concluyendo la especificación del sistema en 1991.

El sistema GSM es un sistema:

1. *De telefonía móvil:* puesto que permite la comunicación entre usuarios móviles.
2. *Celular:* la zona de cobertura se divide en zonas llamadas celdas, a las cuales se asigna un cierto número de radiocanales o frecuencias. Estas celdas cuentan con una infraestructura de estaciones base (a cada celda le corresponde una estación base) que transmiten con la potencia necesaria para alcanzar toda el área de cobertura. La división en celdas permite el reúso de frecuencias y el consiguiente aumento de abonados a los que la red puede dar servicio simultáneamente sin necesidad de aumentar el conjunto de frecuencias contratadas. Cada celda o estación base puede asimismo incluir uno o varios transmisores según el volumen de tráfico cursado. Así, una celda con tres transmisores podrá emitir con tres frecuencias simultáneamente y soportar tres veces más tráfico que una celda con un solo transmisor.
3. *Digital:* dado que supone la solución más económica, sencilla y eficaz para asumir la demanda del mercado e incorporar nuevas posibilidades de servicio, frente a la solución analógica empleada por otros sistemas de telefonía móvil.

En el año 1993 había 36 redes GSM en 22 países. Aunque el sistema GSM es un sistema típicamente europeo, existen redes GSM operativas en alrededor de 80 países de todo el mundo. Con motivo de este desarrollo, se ha asignado un nuevo término al acrónimo GSM: Global System for Mobile Communications. El sistema GSM ofrece las siguientes características:

1. Utilización eficiente del medio de transmisión.
2. Buena calidad de la señal de voz (incluso en condiciones de recepción débil de señal y alta interferencia) a pesar de que el uso del codificador de voz puede provocar ciertas variaciones en el timbre de voz y un retardo hasta cierto punto apreciable.

3. Posibilidad de comunicación entre distintos países sin la necesidad de cambiar de terminal, con el único requisito de acuerdos pertinentes entre los diferentes operadores.
4. Conversaciones seguras por la encriptación de la información en el canal radio.

4.1.1 Sistema Radio

El subsistema radio, que constituye el enlace físico entre las estaciones móviles y la red fija, está formado por una serie de canales. El sistema GSM emplea una modulación multiplexada en el tiempo y en frecuencia. De esta forma, una celda puede transmitir diversas frecuencias (llamadas portadoras) simultáneamente. Cada frecuencia portadora puede soportar además distintos canales (en general dedicados al tráfico de llamadas) gracias a la multiplexación en tiempo, dividiéndose cada trama en 8 slots (o segmentos de tramas), correspondientes con otros tantos canales lógicos (generalmente 1 de control y 7 de tráfico por cada portadora, o bien 8 de tráfico si otra de las frecuencias portadoras de la misma celda ya contiene un canal de control).

El estándar GSM distingue los canales de usuario, que cursan y gestionan las llamadas, de los canales de control propiamente dichos, según la jerarquía siguiente:

• Canales de usuario
    1. Canal de tráfico
    2. Canal de control (asociados durante la comunicación)
       Lento: Control de potencia, medidas, avance temporal
       Rápido: Información de traspaso
• Canales de control
    1. Difusión (Base $\rightarrow$ Móviles)
    2. Acceso (Móviles $\rightarrow$ Base)
    3. Dedicados

Como se ha dicho, los canales de usuario ocupan los slots no destinados a los canales de control (apareciendo éstos como máximo 1 vez por trama), y por tanto quedando 7 u

8 slots de una trama destinados al tráfico y al control de tráfico según el siguiente esquema:

1. Los canales de tráfico soportan la transmisión de la información de voz y datos en forma de ráfagas.
2. Los canales de control asociados aparecen una vez se ha establecido la comunicación y son propios del usuario. Se distinguen dos tipos de canales de control asociado:
   - *Lentos*: transporta información de control de potencia (en bucle cerrado, es decir, la estación base informa al móvil si ha de aumentar o disminuir la potencia transmitida), medidas de potencia (del móvil a la estación base para que ésta decida el control de potencia) e información de avance temporal.
   - *Rápidos*: transmiten la información de traspaso cuando el usuario se traslada de una celda a otra, que debe transferirse al móvil antes de que se interrumpa la comunicación. Por este motivo la transmisión se lleva a cabo sobre un canal de tráfico, pudiendo producirse una ligera degradación de la transmisión.

Por otra parte, los canales de control son comunes a todos los usuarios de una celda siendo utilizados en los pasos previos al establecimiento de la llamada. Estos canales, que han de estar presentes en todas las celdas de la red, ocupan normalmente un solo slot de una de las portadoras de la celda, respondiendo a la siguiente jerarquía:

1. Los canales de difusión se transmiten en el enlace descendente (de la estación base al terminal móvil) y proporcionan distintos tipos de información: configuración del sistema, frecuencia portadora de la estación base (permitiendo así sintonizar el móvil) y frecuencias con canal de control, sincronización con la trama de la estación base, etc.
2. Los canales de acceso son canales ascendentes o de subida (es decir, van del móvil a la estación base) que, al ser comunes a todos los usuarios, requieren la presencia de un mecanismo de acceso al medio. Entre otras funciones controlan las peticiones de llamadas de los usuarios.
3. Finalmente, se encuentran los canales de control dedicados, destinados a transmitir información de control entre la red y el móvil con funciones específicas,

como el intercambio de datos de usuario entre la estación base y el móvil antes de realizarse la comunicación.

4.1.2 Reducción del Nivel de Interferencias

Como todo sistema de telefonía celular, GSM permite el reúso de frecuencias en diferentes estaciones base con el objeto de aumentar la capacidad de tráfico de la red. Esta reutilización comporta, sin embargo, la posible aparición de interferencias entre celdas. De este modo, junto al diseño de una planificación frecuencial adecuada para determinar cuál debe ser la distancia de reúso entre celdas y la utilización de una modulación robusta, el estándar GSM incorpora tres mecanismos para compensar los efectos de las interferencias, siendo decisión de la operadora incluirlos o no en su servicio:

- Control de potencia: permite modificar dentro de un cierto rango la potencia transmitida en ambas direcciones, de móvil a base y viceversa. En GSM se aplica un control de potencia, independiente en ambas direcciones, en función de los niveles de recepción medidos por la estación base y el terminal móvil.
- Transmisión discontinua: detecta la existencia de silencios en la comunicación e inhibe la transmisión radio durante este tiempo (aproximadamente el 50% del tiempo de una llamada nos encontramos a la escucha) para no interferir en celdas contiguas.
- Frequency hopping o conmutación de frecuencia (FH): varía la frecuencia portadora de transmisión, de una trama a otra y a lo largo de una misma comunicación.

El control de potencia y la conmutación de frecuencia además de reducir las interferencias, solucionan algunos problemas relacionados con la utilización del canal radio como medio de transmisión. Así, el primero de ellos permite compensar la atenuación debida a los obstáculos o atenuación lenta, mientras que el segundo contribuye a atenuar los efectos de la propagación multicamino (que induce desvanecimientos rápidos o de “Rayleigh”).

4.1.3 Frequency Hopping

La técnica del Frequency Hopping (también llamada conmutación de frecuencia) consiste en la transmisión de las sucesivas tramas a frecuencias diferentes según una secuencia definida para cada una de las celdas. En este caso, un canal no se corresponde con un time-slot y una única frecuencia portadora, sino con un time-slot y una secuencia de salto. Tras la transmisión de una ráfaga el transmisor conmuta a una frecuencia distinta dentro del grupo de frecuencias de hopping correspondientes, asignadas según criterios de minimización del número de interferencias. Como es lógico, la capacidad de tráfico de una celda viene determinada por el número de frecuencias que la celda es capaz de manejar en un instante de tiempo determinado, y por tanto no depende del número de frecuencias de hopping sino del número de transmisores. De este modo, el número de transmisores de una celda determinará el máximo número de frecuencias que la estación base podrá emitir simultáneamente, con independencia del número de frecuencias con las que pueda trabajar.

De este modo la calidad del enlace puede cambiar de una ráfaga a otra, esto es, una ráfaga con tasa de error elevada puede ir seguida con otra baja, puesto que:

- Los desvanecimientos rápidos son distintos a frecuencias diferentes, debido a que la longitud de los caminos medida en longitudes de onda depende de la frecuencia.
- El nivel de interferencia es distinto para frecuencias diferentes ya que la señal interferente puede ocupar una zona determinada del espectro.

El hecho de que la tasa de error pueda variar en dos tramas sucesivas, junto con la utilización de un código corrector de errores y un sistema de entrelazado de la información, hace posible la reconstrucción de los datos originales incluso en situaciones de interferencias. Sin hopping, en general, esto no ocurre dado que todas las ráfagas o son buenas o son malas.

De otro lado, el hopping no se aplica en ningún caso sobre la frecuencia portadora del canal de control, que se utiliza como referencia de la potencia de las celdas vecinas en los traspasos de celda (cuando el usuario se traslada de un punto a otro) para decidir el instante en que debe realizarse el traspaso.

En GSM el frequency hopping o salto de frecuencia puede implementarse mediante dos técnicas distintas conocidas con el nombre de:

1. Hopping en banda base: a cada transmisor se le asigna una única frecuencia y cada ráfaga de una llamada es encaminada, por un procesador de trama, hacia el transmisor correspondiente de acuerdo con la secuencia de hopping establecida.
2. Hopping sintetizado: en contraposición al anterior, todas las ráfagas de una comunicación son enviadas por el mismo transmisor, que tiene la capacidad de sintetizar las distintas frecuencias de transmisión, según la secuencia de hopping asignada.

Para entrar en modo de operación frequency hopping la red informa al móvil (a través del canal de control de cada celda) del conjunto de frecuencias asignadas y del algoritmo de salto.

4.1.4 Limitación del número de frecuencias

A pesar de que un operador suele contratar un número fijo de frecuencias es posible encontrar diseños frecuenciales GSM en rangos de distinta amplitud, en el sentido no sólo de que el número de frecuencias hopping empleadas en cada celda sea distinto de un diseño a otro, sino de que el propio número de frecuencias disponibles por la red pueda variar significativamente. En primer lugar, la asignación frecuencial se realiza normalmente por separado, repartiendo de un lado las frecuencias para los canales de tráfico (que incorporan en general técnicas de frequency hopping) y de otro las frecuencias asignadas a los canales de control (que, como se ha dicho, no realizan la conmutación de frecuencia y requieren normalmente una única frecuencia portadora por celda). De otro lado la planificación frecuencial puede llevarse a cabo de forma segmentada dividiendo el área de cobertura (una región, un área metropolitana o una ciudad de dimensiones variables) en distintas coronas e incluyendo pequeñas celdas de apoyo llamadas micro y picoceldas (Figura 2.1)

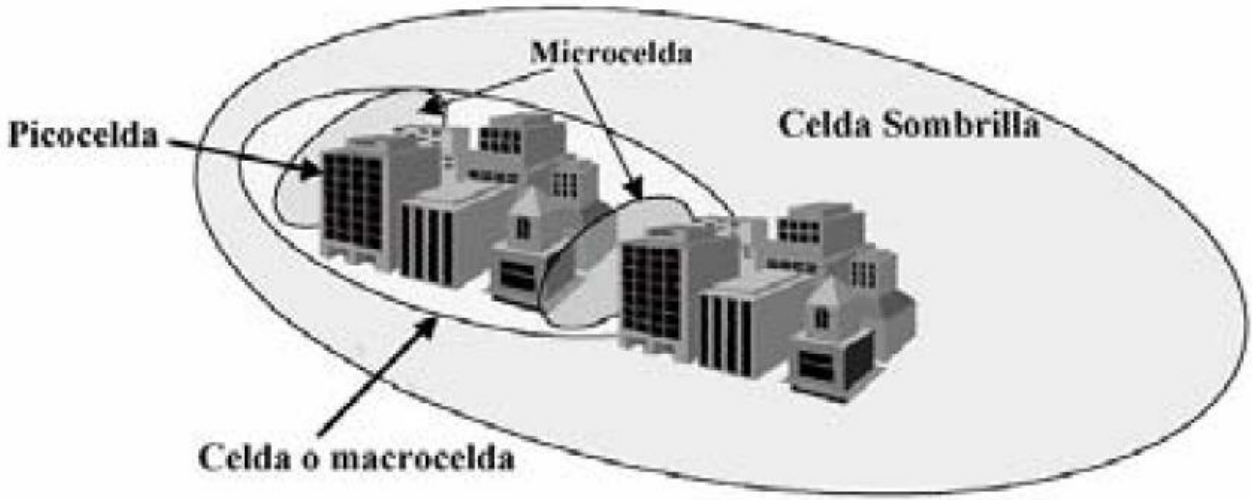


Figura 4.1: Estructura jerárquica de una red de acceso GSM.

Es posible encontrar una planificación frecuencial en la cual la zona correspondiente al centro de una ciudad requiera un número de frecuencias menor que la periferia, debido a la existencia de un número determinado de microceldas, es decir pequeñas celdas (que disponen de un grupo específico de frecuencias reservadas) cuyo área de cobertura es mucho menor que el área de una celda (Figura 4.1). Las microceldas están provistas de antenas directivas dispuestas a escasa altura del suelo y suelen cubrir calles o avenidas, requiriendo un número menor de transmisores que las celdas "normales", aunque es usual que trabajen en saturación. El tráfico que no pueden cursar las microceldas es transferido a las celdas de nivel superior. Asimismo, el reúso de frecuencias entre microceldas no reviste grandes complicaciones gracias a la disposición de las antenas, cuya escasa altura permite a los mismos edificios atenuar las posibles interferencias. De esta forma, la zona de la periferia puede requerir un mayor número de frecuencias hopping debido a la escasa presencia de microceldas fuera del centro comercial de la ciudad (aun así no es descartable la ubicación de algunas microceldas en la periferia como sucede, en el caso de Barcelona, en algunos tramos de la Avenida Diagonal).

Finalmente cabe la posibilidad de que una red GSM incorpore picoceldas, esto es, pequeñas estaciones capaces de ofrecer cobertura en interiores (como por ejemplo estaciones de metro o centros comerciales) y cuyas frecuencias no producen interferencias con el exterior (excepto en las zonas limítrofes, como pueden ser las

escaleras de bajada al metro), así como de incorporar celdas sombrilla, que pueden cubrir un determinado número de celdas de una jerarquía inferior, y cursar el tráfico desbordado. Esta jerarquización (más o menos pronunciada) de la red de acceso a un sistema GSM (así como la presencia de las frecuencias de control) se traduce finalmente, como se ha dicho, en diseños que incorporan en cada caso distintos números de frecuencias.

4.2 Representación de una Red GSM

Un sistema de telefonía celular, como se ha visto, divide la zona de cobertura en distintas áreas denominadas celdas. Cada celda está dominada por una estación base provista de uno o varios transmisores (o transmisoresreceptores, también llamados transceptores), encargados de enlazar los terminales móviles con la red telefónica. Esta división de la zona de cobertura, que permite de un lado reducir la potencia de emisión y de otro reutilizar frecuencias en celdas diferentes (con el objeto de aumentar el número de canales disponibles) provoca sin embargo la aparición de interferencias entre celdas.

De este modo, es preciso antes de definir la asignación frecuencial realizar un estudio riguroso de las interferencias electromagnéticas inducidas por las diferentes celdas de la red. Dada la multiplicidad de factores que deben tenerse en cuenta este análisis no puede ser únicamente teórico, debiendo ir acompañado de un trabajo de campo que permita ajustar los resultados previstos por la teoría.

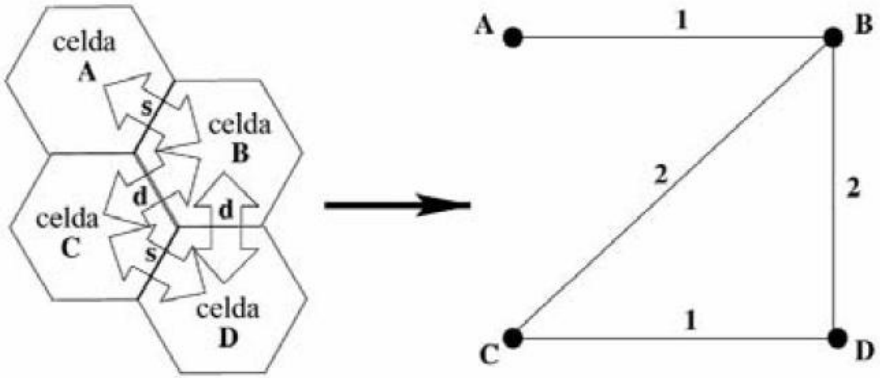


Figura 4.2: Modelado de una red GSM empleando una frecuencia portadora por celda. Las interferencias cocanal se indican con una *s* y las interferencias de canal adyacente con una *d*.

Una red celular puede ser representada mediante un grafo simple con pesos en las aristas, donde los vértices se corresponden con las frecuencias hopping que deben asignarse a cada celda y las aristas unen vértices correspondientes a celdas interferentes (Figuras 4.2 y 4.3). El peso de una arista representa la distancia que han de guardar las frecuencias asignadas a cada uno de los vértices con el fin de no sufrir interferencias. El problema así planteado puede traducirse finalmente en un problema de coloreado de grafos, donde las frecuencias se representan con colores o números enteros, de manera que la separación entre colores de vértices adyacentes (definido como el valor absoluto de su diferencia) ha de ser como mínimo el peso de la arista que los une.

El nivel de interferencias entre celdas viene representado por la matriz de restricciones, cuyos elementos expresan las distancias que deben guardar las frecuencias de las distintas celdas de la red. Aunque pueden considerarse otras posibilidades, el valor de las restricciones es en general un número entero siendo los valores más habituales 1 y 2. Un valor en la matriz de restricciones igual a 1 requiere una separación de por lo menos una unidad entre las frecuencias de las celdas correspondientes, con el objeto de blindar las interferencias producidas por reflexiones, radiación de los lóbulos traseros de un transmisor, cambios rápidos de celda, etc. De otro lado, una restricción igual a 2, presente cuando existe un solapamiento entre celdas, requiere una separación frecuencial de por lo menos dos unidades. La figura 4.2 muestra un ejemplo de modelado de una red GSM.

En una red GSM existe normalmente más de un transmisor por celda siendo el número de transmisores menor o igual que el número de frecuencias hopping. Por otro lado, la asignación frecuencial (en la que tenemos tantos vértices por celda como frecuencias hopping) indicará cuáles son las frecuencias que utilizarán los transmisores, siendo el orden de utilización de éstas distinto en cada uno (siguiendo las secuencias de salto definidas por las tarjetas hardware de la estación base). De este modo cada celda se desdoblará en un número de vértices igual al número de frecuencias de hopping asignadas. Dos vértices serán adyacentes si las celdas de las que proceden interfieren, correspondiéndose el peso de las aristas con el valor respectivo de la matriz de restricciones (Figura 4.4). En el caso en que no se emplee la técnica frequency hopping

el número de frecuencias coincidirá en cada celda con el número de transmisores dado que en esta situación cada uno de los transmisores emite todo el tiempo en una única frecuencia portadora.

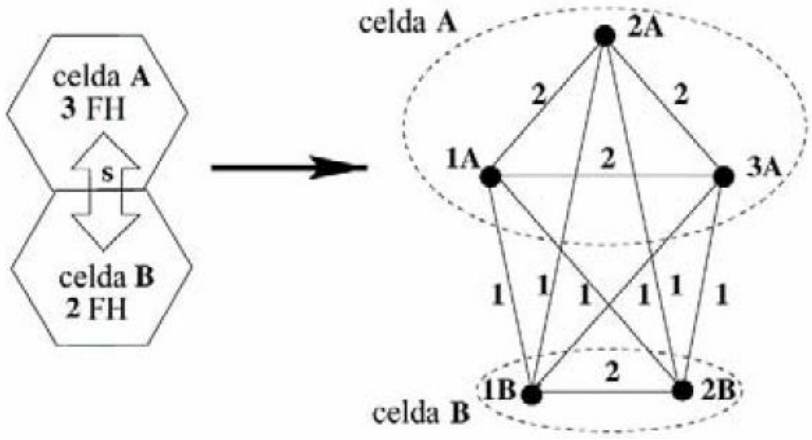


Figura 4.3: Modelado de una red GSM con más de una frecuencia hopping por celda. El número de frecuencias hopping por celda es 2 y 3 respectivamente.

Finalmente, los vértices correspondientes a una misma celda deberán guardar una distancia de dos unidades. En primer lugar, y dado que los distintos transmisores de una celda deben conmutar las distintas frecuencias disponibles, no tiene sentido repetir una frecuencia en una misma celda. Podría darse además el caso de que dos transmisores emplearan simultáneamente la misma frecuencia (en la misma celda), interfiriéndose mutuamente. De otro lado, y debido al control dinámico de potencia, dos terminales móviles emplazados en una misma celda pueden transmitir simultáneamente a potencias distintas (en función de su distancia a la estación base) pudiendo de este modo los lóbulos laterales del móvil de mayor potencia interferir el lóbulo principal del móvil de potencia menor. Debe evitarse así el uso en una misma celda de frecuencias a distancia uno, siendo de este modo el peso de las aristas correspondientes igual o mayor que 2.

4.2.1 Especificaciones para la Asignación de Frecuencias

El problema de la asignación de frecuencias (con o sin hopping) puede caracterizarse, según se ha descrito en el apartado anterior, mediante una matriz de restricciones, un vector que indique el número de transmisores por celda, un vector de requerimientos de frecuencias hopping, un vector de índice de ocupación de la celda y un plan de

frecuencias fijas, alguna de cuyas informaciones puede no emplearse en asignaciones sencillas. Así, mientras la matriz de restricciones y el vector de requerimientos hopping (o el vector de transmisores en caso de no conmutar en frecuencia) modelan la red en términos de teoría de grafos, el vector de transmisores y el vector de ocupación permiten (en el caso de conmutación de frecuencias) calcular la función de coste en el transcurso de la asignación. El plan de frecuencias fijas indica las celdas que no intervienen en la asignación dado que contienen frecuencias que han sido fijadas previamente.

Matriz de restricciones

La matriz de restricciones o de compatibilidad es una matriz cuadrada de *n* filas y *n* columnas (siendo *n* el número de celdas de la red) cuyos elementos recogen la separación frecuencial que ha de existir entre la celda fila y la celda columna correspondientes. Un 0 significa que las dos celdas no interfieren y que, por tanto, pueden utilizar la misma frecuencia. Un valor de 1 indica que existen interferencias cocanal y que por lo tanto las frecuencias entre las celdas han de situarse, cuando menos, a una distancia igual a 1. Finalmente un valor igual a 2 indica la presencia de interferencia de canal adyacente (los lóbulos laterales interfieren la señal principal) de tal modo que la separación frecuencial ha de ser como mínimo de dos unidades. Existe la posibilidad de incorporar restricciones no enteras (valores reales entre 0 y 2) que indicaran los distintos niveles de interferencias entre celdas de la red. Asimismo, los algoritmos deben mantener una separación mayor o igual a 2 entre las frecuencias de una misma celda.

La calidad del servicio depende en gran medida de la precisión de la matriz de restricciones dado que las frecuencias asignadas estarán relacionadas con los valores de los elementos de la matriz. Por esta razón, la matriz de restricciones se ha de construir con extremo detalle, de manera que refleje las características de la red de la forma más precisa posible y siguiendo criterios conservadores en la elección de los valores.

El criterio utilizado para obtener la matriz de restricciones varía según las características del sistema, como pueden ser el control dinámico de potencia, la transmisión

discontinua y el frequency hopping. La misma red puede caracterizarse con diferentes matrices dependiendo de si se representa el subsistema de tráfico, que radia a potencia media cuando hay conversación, o el subsistema de control, que radia con máxima potencia de forma continua con el objeto de facilitar la sintonización de las frecuencias portadoras.

$$M = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \qquad R = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Figura 4.4: Ejemplo de matriz de restricciones y vector de requerimientos para una red de 10 celdas. El vector de requerimientos indica el número de frecuencias hopping por celda o, en el caso en que no se conmute en frecuencia, el número de transmisores por celda.

Vector de Requerimientos de Hopping

Indica el número de frecuencias (en el caso en que se emplee el frequency hopping) que deben asignarse a cada celda. Este número, como se ha visto, determina el número de vértices asociados a cada celda. El número de frecuencias depende de varios factores y ha de ser siempre mayor o igual al número de transmisores de la celda (ya que cada transmisor emitirá en cada instante a una frecuencia distinta del resto de transmisores de la misma celda).

La elección del número de frecuencias hopping puede ser la misma para todas las celdas de la red o variable en función del número de transmisores y del tráfico de la celda.

Vector de Transmisores

Indica el número de transmisores asignados a cada celda, es decir, el número de frecuencias simultáneas radiadas (cifra que no tiene por qué coincidir con el número de

frecuencias de hopping). El número de transmisores se escoge en función del tráfico que ha de cursar la celda que, a su vez, depende del índice de población, del número total de abonados, del tráfico en la hora punta y del grado del servicio ofrecido por el operador de red.

Vector de Ocupación

Indica el porcentaje de ocupación de cada celda. Las restricciones incumplidas entre frecuencias pertenecientes a celdas más ocupadas (porcentajes mayores) tienen una mayor influencia en la interferencia global del sistema.

Plan de Frecuencias Fijas

Contiene un conjunto de frecuencias predeterminado que no puede ser modificado en el proceso de asignación. Esta restricción suele darse en el caso de ampliación de una red previamente planificada, la cual no puede modificar las frecuencias ya existentes en algunas celdas específicas.

Capítulo V
Coloreado y Multicoloreado de Grafos

Introducción

En el presente capítulo se ofrecen algunas definiciones de la teoría de grafos así como del problema clásico del coloreado de grafos. Se definen también los polinomios cromáticos.

De igual forma se trata el problema de la asignación de frecuencias, el cual puede ser planteado en términos de la teoría de grafos como un problema de coloreado y ser resuelto así mediante el empleo de técnicas algorítmicas como Hormigas o Simulated Annealing.

De otro lado, en las redes celulares de telefonía móvil es habitual trabajar con más de una frecuencia por celda debido a los requerimientos de tráfico. Esto implica, en términos de la teoría de grafos, tener que colorear con más de una frecuencia cada vértice (o celda) del grafo resultante, con el propósito de resolverlo como si se tratara de un coloreado simple, desdoblando para ello cada celda en una serie de vértices (tantos vértices como frecuencias tiene asignadas la celda). Las adyacencias de los vértices del grafo construido se describen así en función de las interferencias entre celdas, de modo que dos vértices son adyacentes si pertenecen a celdas interferentes, siendo el peso de la arista que los une igual a la distancia que deben guardar las frecuencias asignadas en cada celda.

Por ello en el presente capítulo, también se desarrolla un modelo teórico que, combinado con las técnicas algorítmicas descritas en los capítulos anteriores, permite colorear un grafo con más de un color por vértice sin necesidad de transformar el grafo ni desdoblar los vértices. Los resultados y métodos descritos son en cualquier caso extrapolables para un número mayor de colores e incluso para el caso genérico en que cada vértice lleve asociado un número variable de colores. En nuestro caso, explicaremos como realizar un 3-coloreado partiendo de un 2-coloreado.

5.1 Teoría de Grafos. Definiciones

Un grafo simple *G* es un par *(V(G),E(G))* tal que *V(G)* es un conjunto finito de elementos denominados vértices y *E(G)* un conjunto finito de pares no ordenados de vértices.

Cada uno de los elementos de *E(G)* se denomina arista. Tanto los vértices como las aristas de un grafo pueden incluir etiquetas definidas a partir de aplicaciones $\Phi:V(G)\rightarrow\mathbf{Z}$ y $\Phi':E(G)\rightarrow\mathbf{Zr}$. El orden *n* de un grafo *G=(V,E)* es el número de vértices o cardinal de *V(G).* Asimismo se define el tamaño *E* de un grafo *G=(V,E)* como el cardinal de *E(G)* o el número de aristas de *G*.

Según la definición, un grafo simple no puede tener aristas repetidas, esto es, pares de vértices unidos por más de una arista, ni tampoco lazos (aristas que enlazan un mismo vértice). En lo sucesivo cada vez que nos refiramos a un grafo *G* se entenderá que *G* es un grafo simple.

Se dice que dos vértices *u* y *v* son adyacentes cuando los une una arista. En este caso se dice que los vértices *u* y *v* inciden sobre la arista *uv* o bien que la arista *uv* incide sobre los vértices *u* y *v*. Dos aristas son adyacentes cuando tienen un vértice en común. El grado $\delta(v)$ de un vértice *v* es el número de aristas que inciden sobre *v*.

Dado un grafo simple de orden *n* el número máximo de aristas que puede contener es igual a *n(n-1)/2*. Se define así la densidad $\rho(G)$ de un grafo *G* de orden n como el cociente entre el número de aristas del grafo *G* y el máximo número de aristas que puede contener un grafo de orden *n*. De este modo:

$$\rho(G)=\frac{E}{n(n-1)/2}=\frac{2E}{n(n-1)}$$

Un clique $C\subset V(G)$ de un grafo *G* es un conjunto de vértices de *V(G)* tal que todo par de vértices de *C* son adyacentes entre sí. De otro lado se denomina conjunto independiente a un conjunto $S\subset V(G)$ de vértices tales que no son adyacentes dos a dos.

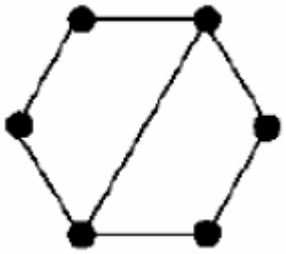


Figura 5.1: Ejemplo de Grafo Conexo.

Una secuencia de aristas es una sucesión de aristas consecutivas V_0 V_1, V_1V_2,……., $V_{m-1}V_m$. De este modo la secuencia dibuja un camino continuo sobre el grafo. Una secuencia en la que no se repiten aristas se denomina cola y si tampoco se repite ningún vértice, trayecto. Un trayecto cerrado tal que el primer y el último vértice coinciden se denomina circuito.

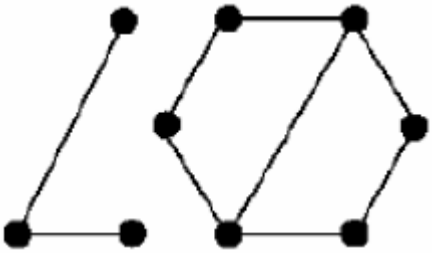


Figura 5.2: Ejemplo de Grafo No Conexo.

Se dice que un grafo *G* es conexo cuando es posible trazar al menos un trayecto entre dos vértices cualesquiera de *V(G).* Cada uno de los conjuntos conexos de vértices en que puede descomponerse un grafo no conexo se denomina componente conexa del grafo. La distancia *d*(*u*,*v*) entre dos vértices *u* y *v* se define como el cardinal mínimo de todos los trayectos entre *u* y *v*, es decir, el número mínimo de aristas que hay que recorrer para llegar de un vértice a otro. Cuando un grafo no es conexo y dos vértices pertenecen a componentes distintas se dice que su distancia es infinita. Se denomina diámetro de un grafo *G* a la distancia máxima entre dos vértices cualesquiera de *G*.

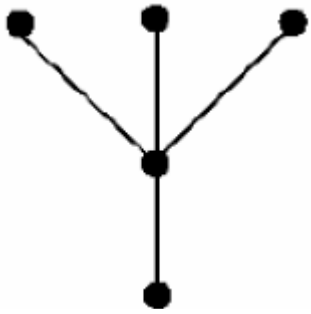


Figura 5.3: Ejemplo de Árbol.

Un grafo conexo sin ningún circuito es un árbol. Un grafo completo K_n es un grafo simple tal que todos sus pares de vértices están unidos por una arista. De este modo el tamaño de K_n es igual a $n(n-1)/2$. De otro lado, un grafo cuyos vértices tienen todos el mismo grado es un grafo regular. Concretamente se dice que G es un grafo regular de grado r si todos sus vértices tienen grado r.

Un grafo G es bipartito si su conjunto $V(G)$ de vértices admite una partición en dos subconjuntos V_1 y V_2 tales que $V_1 \cup V_2 = V(G)$ y $V_1 \cap V_2 = \varnothing$ y tales que cada una de las aristas de $E(G)$ une un vértice del subconjunto V_1 con un vértice de V_2 . De este modo ningún par de vértices de V_1 ni de V_2 son adyacentes entre sí. En el caso en que cada uno de los vértices de V_1 sea adyacente a cada uno de los vértices de V_2 diremos que el grafo es un grafo bipartito completo $K_{n,m}$ siendo n y m los cardinales respectivos de V_1 y V_2.

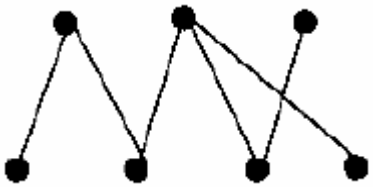


Figura 5.4: Ejemplo de Grafo Bipartido.

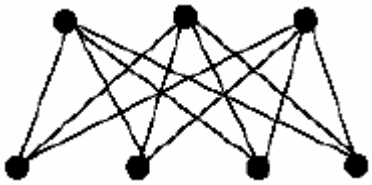


Figura 5.5: Ejemplo de Grafo Bipartido Completo $K_{4,3}$.

Dados dos grafos cualesquiera $G_1= (V_1, E_1)$ y $G_2= G (V_2, E_2)$, G_2 es subgrafo de G_1 si $V_2 \subseteq V_1$ y $E_2 \subseteq E_1$. Si $V_2= V_1$ entonces G_2 es subgrafo generador de G_1. En caso de que G_2 conserve las aristas de G_1, es decir, en el caso de que todo par de vértices del grafo G_2 sean adyacentes si y sólo si son adyacentes en G_1, diremos que G_2 es un subgrafo inducido de G_1.

Un grafo $G=(V,E)$ es plano si puede dibujarse sobre el plano sin que ninguna de sus aristas se corte. De otro lado un grafo $G=(V,E)$ es planar si existe algún grafo isomorfo a G y plano.

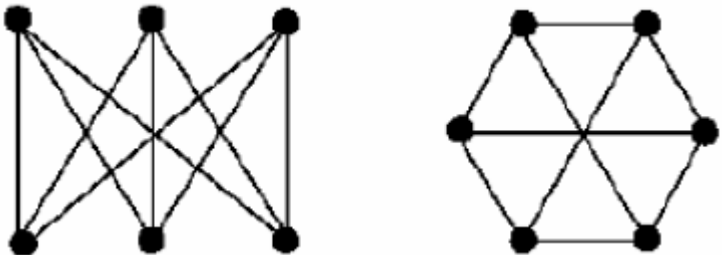


Figura 5.6: Ejemplo de Grafos Isomorfos.

5.1.1 Coloreado de Grafos

Un grafo G es k-coloreable o k-partito si existe una aplicación $\Phi:V(G)\rightarrow\{1,...,k\}$ tal que $\Phi(u)\neq\Phi(v)$ para todo par de vértices u y v adyacentes (es decir, tal que dos vértices adyacentes tengan siempre imágenes distintas). La aplicación Φ suele denominarse coloreado de los vértices del grafo G y cada uno de los enteros asignados a cada vértice color.

El número cromático $X(G)$de un grafo G es el mínimo entero k tal que G es k-coloreable. Puede asimismo definirse el coloreado de las aristas como una función $\Phi':E(G)\rightarrow\{1,...,k\}$ tal que dos aristas adyacentes tienen imágenes distintas (i.e. colores distintos asignados). En este caso se dice que el grafo G es k-arista coloreable. Finalmente, el índice cromático $X'(G)$ de un grafo G es el mínimo entero k tal que G es k-arista coloreable.

El problema de la arista coloreado de un grafo puede transformarse en un problema de vértice coloreado a través del grafo línea. Dado un grafo $G=(V,E)$se define el grafo línea

Γ(*G*)de *G* como un grafo tal que sus vértices se corresponden con las aristas de *G* y tal que dos vértices de Γ(*G*) son adyacentes si y sólo si las aristas correspondientes de *G* son adyacentes entre sí.

El número cromático de un grafo completo K_n es *n*. De otro lado, el número cromático de un grafo bipartito es por definición igual a 2. Puede demostrarse que un grafo es bipartito si y sólo si no contiene ningún circuito con un número impar de aristas.

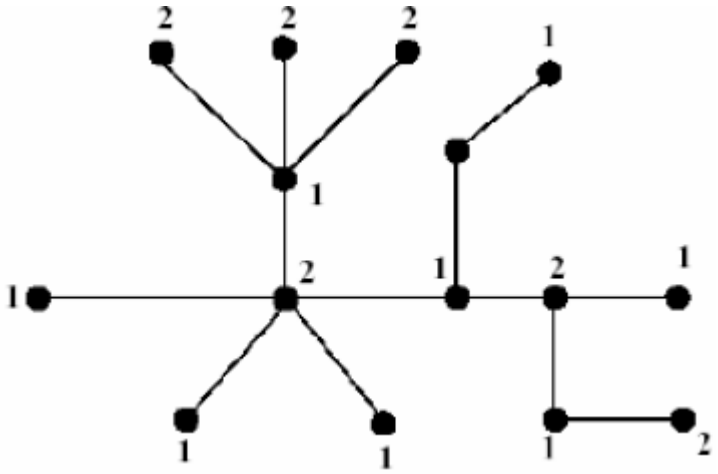


Figura 5.7: Ejemplo 2-coloreado de un Grafo Bipartido.

Dado un grafo cualquiera *G* su número cromático es siempre menor o igual al número de vértices. De otro lado, un grafo que contiene un clique de orden *r* (es decir un subgrafo completo de orden *r*) tiene un número cromático mayor o igual a *r*. Estas cotas pueden ajustarse en función del grado de los vértices del grafo.

Teorema 5.1: *Un grafo G*=(*V*,*E*) *de grado máximo* Δ *es* (Δ +1)*-coloreable.*

Demostración: Por construcción del grafo. Supóngase que tenemos una lista de Δ +1 colores y que el grafo se forma añadiendo los vértices de forma sucesiva y las aristas correspondientes en cada caso. En este caso cada vez que se añada un vértice *v* podrá asignársele un color de la lista de Δ +1 colores que sea diferente de los colores de, a lo sumo, los Δ vértices adyacentes a *v.* De este modo en el momento en que se añada el último vértice se habrá obtenido además un Δ +1-coloreado del grafo.

Esta cota puede mejorarse para el caso en que *G* sea un grafo simple conexo y no completo de grado máximo $\Delta \geq 3$. En este caso *G* es Δ -coloreable. Estas cotas no son sin embargo restrictivas en general. En el caso del grafo bipartito completo $K_{n,m}$ el grado máximo del grafo $\Delta = \max\{n,m\}$ puede ser arbitrariamente grande resultando siempre un número cromático igual a 2. De otro lado puede demostrarse que todo grafo planar es 5-coloreable.

5.1.2 Polinomios Cromáticos

Sea *G* un grafo simple y sea *PG (k)* el número de coloreados distintos que admite *G* con un número de colores igual a *k*. Dado que como se demuestra a continuación *PG (k)* es una función polinómica que depende del número *k* de colores, *PG (k)* se denomina polinomio cromático de *G*.

Así, por ejemplo, para el grafo de la figura 5.8 el polinomio cromático es $PG(k) = k(k-1)^2$ dado que el vértice central puede ser coloreado con cualquiera de los *k* colores disponibles y los extremos con cualquier otro color distinto del vértice central. Este resultado puede generalizarse para cualquier árbol siendo el polinomio cromático de un árbol *An* de orden *n* el polinomio $PAn(k) = k(k-1)^{n-1}$.

Figura 5.8: Grafo de Polinomio Cromático $k(k-1)^2$

Del mismo modo para el grafo completo de orden 3 se tiene $P_{K3}(k) = k(k-1)(k-2)$ y en general en $P_{Kn}(k) = k(k-1)\ldots(k-(n-1))$ el caso en que $k \geq n$.

Para todo entero *k* menor que el número cromático de un grafo $X(G)$ se tiene $P_G(k) = 0$. De otro lado si $k \geq X(G)$ entonces $P_G(k) > 0$. El siguiente teorema y corolario demuestran además que dado un grafo simple *G* de orden *n* la función P_G es un polinomio de grado *n*.

Teorema 5.2: *Sean v y w dos vértices no adyacentes de un grafo G. Sea G1 el grafo obtenido de añadir a G una arista entre v y w y sea G2 el grafo que resulta de identificar los dos vértices. En este caso se cumple:*

$$P_G(k) = P_{G_1}(k) + P_{G_2}(k)$$

Demostración: Dado un *k*-coloreado cualquiera de *G* los vértices *v y w* pueden tener el mismo color o bien colores distintos. El número de coloreados en los cuales *v* y *w* tienen colores distintos es igual a P_{G1}. De otro lado el número de coloreados en los cuales *v* y *w* comparten el mismo color es igual a P_{G2}. De este modo se cumple que:

$$P_G(k) = P_{G_1}(k) + P_{G_2}(k)$$

Esta propiedad queda ilustrada en el ejemplo de la figura 5.9. Calculando el polinomio cromático de cada uno de los grafos puede verse que efectivamente se cumple la igualdad del teorema 5.2 de modo que: $k(k-1)(k-2)2 = k(k-1)(k-2)(k-3)+k(k-1)(k-2)$.

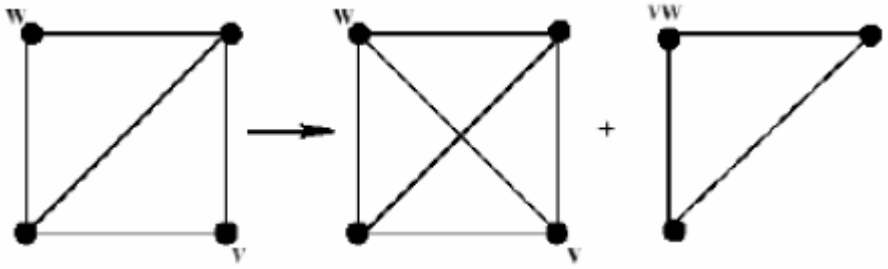


Figura 5.9: Descomposición del Grafo G en G1 y G2.

Corolario 5.2: *La función cromática de un grafo simple de orden n es un polinomio mónico de grado n.*

Demostración. Se itera el procedimiento de descomposición del teorema 5.2 tomando en cada caso un par de vértices no adyacentes. De este modo el proceso terminará cuando cada uno de los pares de vértices de los grafos resultantes sean adyacentes, es decir, cuando todos los grafos resultantes sean completos. De otro lado, según el teorema 5.2 el polinomio cromático *PG*(*k*) es igual a la suma de los polinomios P_{ki} *(k)* de los grafos completos generados. Como estos valores, según se ha visto, son funciones polinómicas *PG*(*k*) será también un polinomio. De otro lado, como en ningún paso se han introducido vértices en la operación, de todos los grafos completos finales el de mayor orden es K_n que además sólo aparecerá una vez. De este modo *PG*(*k*) tendrá grado *n* y además el coeficiente del término de mayor grado será 1.

Puede asimismo demostrarse que el coeficiente del término de grado $n-1$ es igual al número de aristas del grafo cambiado de signo. De otro lado como por definición $PG(0) = 0$ el término independiente del polinomio cromático de cualquier grafo es 0.

5.2 Multicoloreado de Grafos

Sea un grafo $G = (V,E)$, se define un r-multicoloreado o un r-tuple coloreado de G como una asignación de colores (o enteros) a los vértices de G, de forma que cada vértice tenga asignados r colores diferentes y dos vértices adyacentes no tengan ningún color en común.

Se define asimismo el número r-multicromático o más genéricamente número multicromático $X_r(G)$ de un grafo G como el cardinal del mínimo conjunto de colores necesarios para r-multicolorear G. En ocasiones, cuando no haya posibilidad de ambigüedad, nos referiremos al número multicromático como número cromático $X_r(G)$.

Proposición 5.1: Sea $X(G) = k \Rightarrow Xr(G) \leq r \cdot k$

Demostración. Se puede r-multicolorear el grafo repitiendo r veces el primer coloreado con k colores (de 1 a k el primer coloreado, de $k+1$ a $2k$ el segundo coloreado, y así sucesivamente).

Es sencillo demostrar además la existencia de grafos para los cuales $X_r(G) < r \cdot k$. Así, por ejemplo, el ciclo de orden 5 (y en general cualquier ciclo C_n con n impar), que tiene número cromático $X(C5)=3$, puede ser 2-multicoloreado con 5 colores, tal y como ilustra la figura 5.10.

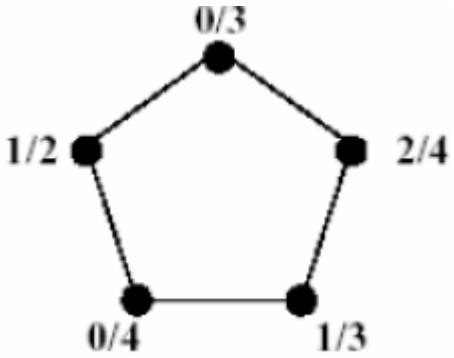


Figura 5.10: Ejemplo de 2-multicoloreado de un ciclo de orden 5.

De otro lado, si se tiene un *r*-multicoloreado con X_r (*G)* colores, se puede conseguir un (*r* +1) -multicoloreado añadiendo a cada vértice un nuevo color (escogido entre $X_r(G)$ +1 y X_r (*G)* +*k*) y distribuido según un coloreado simple de X(*G*)=*k*-colores.
De este modo,

$$\begin{aligned} &X(G) = k \\ &X_2(G) \le 2k \qquad X_2(G) = 2k - \Delta_2 \qquad \Delta_2 \ge 0 \\ &X_3(G) \le 3k - \Delta_2 \quad X_2(G) = 2k - \Delta_2 - \Delta_3 \qquad \Delta_3 \ge 0 \end{aligned}$$

Y en general,

$$X_r(G) \le X_{r-1}(G) + k \qquad X_r(G) = rk - \sum_{i=2}^{r} \Delta_i \qquad \Delta_i \ge 0$$

donde Δ_i puede ser mayor, igual o menor que Δ_{i+1} , según se demuestra más adelante en el teorema 5.3.

5.2.1 Cotas Generales

Se ofrecen a continuación algunos resultados simples sobre las cotas del número multicromático de un grafo *G*.

Proposición 5.2: *Sea un grafo G tal que contiene un clique de orden c. En este caso se cumple* X_r *(G)* $\ge r \cdot c$.

Demostración: Inmediata dado que ninguno de los *r* coloreados podrá utilizar menos de *c* colores distintos en cada caso.

Proposición 5.3: *Dado un grafo G de orden n tal que S es el orden del conjunto independiente máximo de G. En este caso,*

$$X_r(G) \ge \left\lceil \frac{r \cdot n}{S} \right\rceil$$

Demostración: Dado un color *j* cualquiera, *j* puede ser asignado en como máximo *S* vértices diferentes. De otro lado, si queremos multicolorear *G* con *r* colores en cada vértice tendremos un total de $n \cdot r$ colores asignados a lo largo de todo el grafo (contando las repeticiones). De aquí,

$$X_r(G) \ge \left\lceil \frac{r \cdot n}{S} \right\rceil$$

Proposición 5.4: *Dado un grafo G conexo y no completo de grado máximo* Δ ≥ 3 *se cumple* ( ) *r X G* ≤*r*⋅Δ.

Demostración: Por el teorema de Brooks el número cromático de un grafo *G* cumple X(*G*)≤Δ si *G* es conexo y no es completo y tiene grado máximo Δ ≥ 3 . Entonces aplicando la proposición 5.1 se obtiene Xr (*G) =r*⋅X(*G)* ≤*r*Δ.

Proposición 5.5: *Dado un grafo G de número r-multicromático* Xr(*G) se cumple* $X_r(G)$ ≤min{$X_i(G)+X(G)$ | *i+ j =r* } ≤*rX G.*

Demostración: La primera desigualdad se deduce del hecho de que para obtener un multicoloreado con *r* colores pueden superponerse dos multicoloreados con *i* y *j* colores por vértice respectivamente, si *i+j =r*. De otro lado, de la proposición 5.1 y para *i+j =r*, queda,

$$\mathrm{X}_i(G)+\mathrm{X}_j(G) \le iX(G)+jX(G)=rX(G)$$

5.2.2 Número Multicromático de algunas familias de Grafos

Se calcula a continuación el número cromático de algunas familias de grafos.

Proposición 5.6: *El número r-multicromático de un grafo completo de orden n es* X_r (K_n) *=n*⋅*r.*

Proposición 5.7: *Sea G*=(*V*,*E*) *un grafo bipartito. En este caso* X_r (*G)*= 2*r.*

Demostración: Dado un grafo *G*= (*V*,*E*) bipartito, existe al menos un multicoloreado de *G* con 2*r* colores (superponiendo *r* veces el primer coloreado con dos colores) y por lo tanto X_r (*G)*≤ 2*r*. De igual forma X_r (*G)*≤ 2*r* ya que todo grafo bipartito contiene un clique de orden 2. Por lo cual X_r (*G)*≤ 2*r*.

Teniendo en cuenta que un árbol es un caso particular de grafo bipartito no nulo se obtiene el siguiente corolario.

Corolario 5.7: *El número r-multicromático de un árbol A es* X_r (*A)*≤ 2*r.*

En estos casos, tanto si G es un grafo completo como si es bipartito, se obtiene para la expresión (5.1) un incremento del número r-multicromático según aumenta *r* tal que $\Delta r=0 \ \forall \ r \geq$.

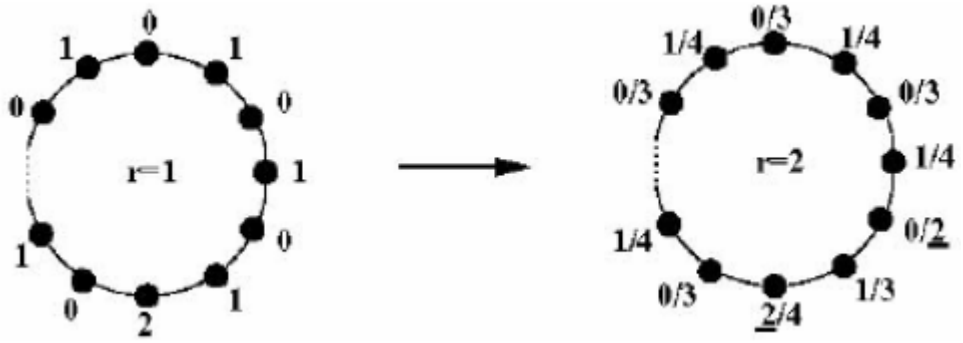


Figura 5.11: Ejemplo de ciclo de orden *n* con *n* impar.

Proposición 5.8: *Sea Cn un ciclo de orden n. Entonces,*

$$X_r(C_n)=\begin{cases}2r & \text{si } n \text{ par}\\ 2r+\left\lceil \dfrac{2r}{n-1}\right\rceil & \text{si } n \text{ impar}\end{cases}$$

Demostración: En el caso en que el orden *n* es par el ciclo C_n es bipartito. El número cromático se deduce entonces de la proposición 5.7. De otro lado, para colorear un circuito con *n* vértices para *n* impar, se necesitan como mínimo 3 colores. Ahora bien, para 2-multicolorear este grafo sólo se necesitan 5 colores, dado que se puede aprovechar uno de los colores *c* del primer coloreado (supóngase que *c* sólo se ha empleado una vez en la primera asignación) en un vértice no adyacente y colorear los vértices restantes según el esquema del primer coloreado, con dos nuevos colores (figura 5.10). Este esquema podría repetirse para el tercer y cuarto coloreado (aprovechando siempre el color *c* del primer coloreado) y así sucesivamente hasta que no fuera posible reutilizar el color *c*. Como el conjunto independiente máximo de C_n tiene orden n-1/2, el color c puede repetirse un número de veces igual a n-1/2, pudiéndose utilizar (n-1/2)-1 ocasiones. De esta forma,

$$X_1(C_n)=3$$
$$X_2(C_n)=5$$
$$X_3(C_n)=7$$

Hasta,

$$\chi_{\frac{n-1}{2}}(C_n) = 3 + 2\left(\frac{n-1}{2} - 1\right) = n$$

Para el siguiente coloreado se necesitarían entonces 3 nuevos colores, dado que no podría utilizarse de nuevo el color *c* ni ninguno de los anteriores, repitiéndose en este punto el mismo proceso anterior. Así, en cada incremento de colores (es decir cada vez que pasemos de un *r*-multicoloreado a un *r+1*-multicoloreado) se necesitarán dos nuevos colores, excepto cuando se pasa de r= [n-1/2] ($1 \in \not\subset$) a r+1, donde el incremento es de 3 unidades. De este modo se deduce la siguiente cota del número cromático,

$$\chi_r(C_n) \leq 2r + \left\lceil \frac{r}{(n-1)/2} \right\rceil = 2r + \left\lceil \frac{2r}{(n-1)} \right\rceil$$

De otro lado, teniendo en cuenta que para un ciclo *Cn* impar el orden del conjunto independiente máximo es *S*= (*n*−1) / 2, puede obtenerse según la siguiente cota inferior del número cromático de C_n con *n* impar,

$$\chi_r(C_n) \geq \left\lceil \frac{rn}{(n-1)/2} \right\rceil = 2r + \left\lceil \frac{2rn}{(n-1)} \right\rceil$$

De este modo, combinando las dos cotas así obtenidas se obtiene,

$$\left\lceil \frac{2rn}{(n-1)} \right\rceil \leq \chi_r(C_n) \leq 2r + \left\lceil \frac{2r}{(n-1)} \right\rceil$$

Ahora bien, dado que r$\in \not\subset$,

$$\left\lceil \frac{2rn}{(n-1)} \right\rceil = \left\lceil \frac{2r(n-1)+2r}{n-1} \right\rceil = \left\lceil 2r + \frac{2r}{n-1} \right\rceil = 2r + \left\lceil \frac{2r}{n-1} \right\rceil$$

Quedando finalmente,

$$\chi_r(C_n) = 2r + \left\lceil \frac{2r}{(n-1)} \right\rceil = \left\lceil \frac{2rn}{(n-1)} \right\rceil$$

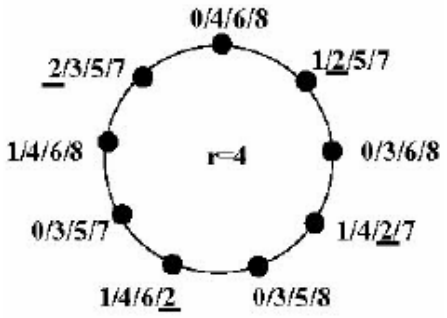


Figura 5.12: Ejemplo de 4-multicoloreado de un ciclo de orden 9.

La figura 5.12 muestra el esquema de multicoloreado descrito en la demostración anterior para el caso de un ciclo C_9. En este caso se cumplirían las siguientes desigualdades,

$$\begin{array}{lll} X_1(C_9) \le 3 & X_5(C_9) \le 12 & X_9(C_9) \le 21 \\ X_2(C_9) \le 5 & X_6(C_9) \le 14 & \ldots \\ X_3(C_9) \le 7 & X_7(C_9) \le 16 & \\ X_4(C_9) \le 9 & X_8(C_9) \le 18 & \end{array}$$

En el caso de los ciclos impares puede observarse además que cuando *r* es múltiple del orden *S* del conjunto independiente máximo, r=1·S=1·(n-1/2), entonces X_r (C_n) n·1. En estos casos es lo mismo *r*-multicolorear C_n que superponer 1 veces un n-1/2 multicoloreado, ya que $X_{n-1/2}$ (C_n)=n.

Teorema 5.3: *Dado un grafo G de número r-multicromático* X_r*. Entonces, se cumple, donde* Δ_i *puede ser mayor, igual o menor que* Δ_{i+1}*.*

$$X_r(G) = rk - \sum_{i=2}^{r} \Delta_i$$

Demostración: Para demostrar que Δ_i puede ser mayor, igual o menor que Δ_{i+1} basta tomar el multicoloreado de C_9 descrito en la figura 5.12, y calcular Δ_i para cada valor *r.*

$$\begin{array}{ll} X_1(C_9) \le 3 & \\ X_2(C_9) \le 5 & \Delta_2 = 1 \\ X_3(C_9) \le 7 & \Delta_3 = 1 \\ X_4(C_9) \le 9 & \Delta_4 = 1 \\ X_5(C_9) \le 12 & \Delta_5 = 0 \\ X_6(C_9) \le 14 & \Delta_5 = 1 \end{array}$$

De este modo se deducen las siguientes tres posibilidades,

$$\begin{array}{ll} \Delta_i = \Delta_{i+1} & (\Delta_2 = \Delta_3) \\ \Delta_i > \Delta_{i+1} & (\Delta_4 > \Delta_5) \\ \Delta_i < \Delta_{i+1} & (\Delta_5 < \Delta_6) \end{array}$$

Puede verse asimismo que para el ciclo C_n con *n* impar Δ_i =0 para i=(n-1/2)·1 y Δ_i =1 en el resto de los casos. De este modo se tendrá, para i=(n-1/2)·1 y para un ciclo de grado impar, $\Delta_i > \Delta_{i\pm1}$.

5.2.3 Grafos Ajustables y Grafos Perfectos

Se define un grafo ajustable como un grafo *G* tal que X(*G*)=*c* donde *c* es el orden del clique máximo de *G*. De otro lado, un grafo es *r*-ajustable si $X_r(G) = rc$ $r \in \not\subset$. De esta forma, si un grafo es *r*-ajustable entonces $\Delta_i = 0 \ \forall \ i \geq 2$.

Proposición 5.10: *Si G es ajustable* $\Rightarrow$ *G es r-ajustable* (*r* ≥ 1).

Demostración: Si *G* es ajustable $\Rightarrow$ X(*G*)=*c*. Entonces, considerando la proposición 5.1, resulta $rc \leq X_r(G) \leq rc$ y por tanto $X_r(G) = rc$.

Se dice que un grafo *G* es perfecto si todo subgrafo inducido de *G* se puede colorear con un número de colores igual al orden del clique máximo del subgrafo inducido.

Proposición 5.11: *Todo grafo perfecto es, por definición, ajustable pero no todo grafo ajustable es perfecto.*

La figura 5.13 ilustra un ejemplo de grafo ajustable no perfecto. Si en este grafo, que es ajustable (ya que se puede colorear con un número de colores igual al orden del clique máximo, en este caso 3), se elimina el vértice *w*, el subgrafo inducido resultante no es coloreable con un número de colores igual al orden del clique máximo (ahora igual a 2) y en consecuencia no es un grafo perfecto.

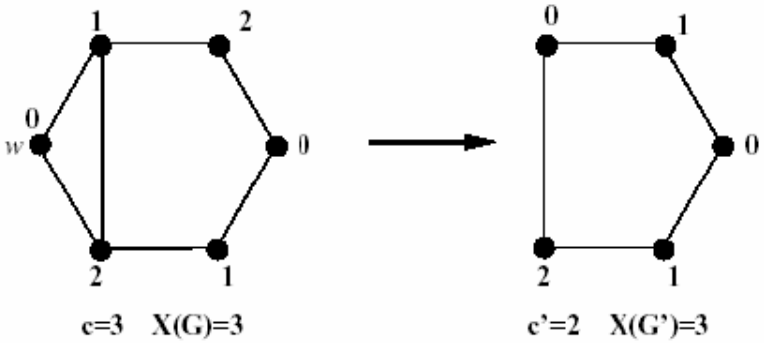


Figura 5.13: Ejemplo de grafo ajustable no prefecto

La caracterización de un grafo *r*-ajustable tiene especial interés en el coloreado y multicoloreado de grafos dado que permite establecer cotas inferiores del número cromático.

5.3 Reutilización de Colores en el Multicoloreado de Grafos

Según la proposición 5.1 es posible, en algunos casos, r-multicolorear un grafo con un número de colores menor que *r* veces el número cromático. Como se ha visto este ahorro se produce gracias a la reutilización de colores. En la figura 5.14 se ha 2-multicoloreado (o doblecoloreado) un grafo, aprovechando en la segunda asignación de algunos vértices colores del primer coloreado. Una vez coloreados estos vértices debe colorearse (para obtener un doblecoloreado final del grafo) el subgrafo inducido formado por los vértices restantes, es decir los vértices que no reutilizan colores. De esta forma, el 2-multicoloreado de un grafo $G(V,E)$ puede dividirse en tres coloreados simples:

1. Coloreado de G.
2. Coloreado (compatible con el primero) de un subconjunto $S \subset V$ de vértices de G reutilizando colores del primer coloreado.
3. Coloreado del subgrafo inducido resultante de eliminar los vértices de S.

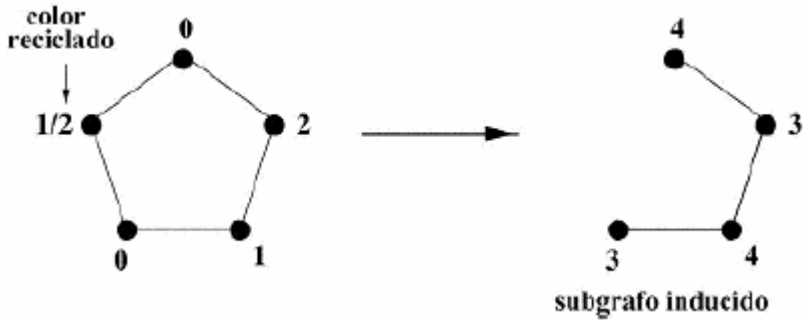


Figura 5.14: Ejemplo de subgrafo inducido tras reutilizar colores.

En cualquier caso, el proceso de reasignación y construcción del subgrafo inducido, así como su posterior coloreado, no es un problema sencillo. De este modo, el proceso anterior debe plantearse en términos tales que pueda ser resuelto algorítmicamente y aplicando los mismos métodos combinatorios descritos en los capítulos anteriores. En primer lugar, se sabe que la forma óptima de colorear el subgrafo inducido es un

problema NP-completo, a pesar de lo cual se conocen herramientas algorítmicas capaces de obtener soluciones cuasi-óptimas, como Hormigas o Simulated Annealing. De otro lado, la reutilización en el segundo coloreado de colores del primer coloreado debería dar como resultado un subgrafo inducido lo más sencillo posible en términos del coloreado del grafo. De este modo, la construcción del subgrafo inducido debe considerar ciertos parámetros relacionados con la dificultad de coloreado, como por ejemplo la densidad del grafo o el grado medio. El subgrafo inducido dependerá además de la distribución de los colores del primer coloreado, de modo que distribuciones distintas (aun en el caso en que empleen el mismo número de colores) pueden dar lugar a subgrafos inducidos distintos.

En el presente apartado se describe un método algebraico de reutilización de colores, proponiéndose a continuación distintos esquemas de selección en función de la naturaleza del problema.

Definición 5.1: *Sea un grafo G(V,E) de orden n y un coloreado simple* $\Phi : V(G) \rightarrow \{1,...,k\}$ *de G, con un número k de colores. Se define la matriz C de n filas y k columnas, donde las filas representan los n vértices de un grafo G, y las columnas los k colores utilizados en* $\Phi(G)$*, como la matriz de elementos* c_{ij} *tales que,*

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$$

si ni el vértice i, y ningún vértice adyacente a i tienen el color j en caso contrario.

De este modo, un valor $c_{ij}= 1$, significa que puede cambiarse el color del vértice *i* por el color *j* (dado que ningún vértice vecino ni tampoco el mismo vértice *i* lo emplean) o más sencillamente que puede añadirse el color *j* al vértice *i* además del color inicial. A pesar de ello, debe notarse que no todos los cambios (o adiciones) correspondientes a c_{ij} no nulos pueden realizarse simultáneamente, ya que de este modo podría asignarse el mismo color a vértices adyacentes.

Definición 5.2: *Sea un grafo G(V,E) y sea* $\Phi(G)$ *un coloreado simple de G. Se define* $V_i \subset V$ *como el subconjunto de vértices* $v \in V$ *talesque* $\Phi(v)=i$*, es decir el conjunto de*

vértices que tienen asignados según Φ (G) el color i (de este modo los vértices de Vi no son adyacentes). Un subconjunto Vi es completo si las filas de C correspondientes a cada uno de los vértices de Vi son no nulas, es decir, si todos sus vértices pueden aprovechar algún color del primer coloreado.

Proposición 5.14: *Sea un grafo G(V,E) y sea Φ (G) un coloreado simple de G con un número k de colores. Si existe para Φ (G) un conjunto V_i completo entonces G(V,E) es (k-1)-coloreable.*

Demostración. *En primer lugar G es k-coloreable puesto que puede colorearse según Φ(G) con un número k de colores. De otro lado, según la definición puede añadirse a cada vértice $v \in Vi$ un nuevo color (que puede o no repetirse) sin posibilidad de conflicto, dado que los vértices de V_i no son adyacentes. Por lo tanto, si existe un V_i completo se puede reemplazar, con arreglo a la matriz C, el color original i de cada uno de los vértices de V_i por otro color de Φ (G) y colorear G con k-1 colores, es decir, todos los colores de Φ (G) menos el color i.*

En este caso además G podrá ser 2-multicoloreado según la proposición 5.1 con un número de colores igual a *2k-2*.

De otro lado, en el caso en que más de un conjunto V_i del grafo *G* sea completo, debería comprobarse la existencia de incompatibilidades. Así, si por ejemplo se tienen dos conjuntos V_i y V_j completos es posible que existan dos subconjuntos de vértices V_i ' y V_j ', incluidos en V_i y V_j respectivamente, que contengan adyacencias entre ellos y que, por lo tanto, incluyan vértices que no puedan tener el mismo color asignado. En este caso, si según la matriz *C* no existe ningún coloreado compatible de los vértices de V_i ' y V_j ', entonces los subconjuntos de vértices V_i y V_j se llaman incompatibles. Si, contrariamente son compatibles *G* podrá ser coloreado con k-2 colores (los *k* colores de la asignación inicial menos los colores *i* y *j*), y de este modo podrá 2-multicolorearse *G* con al menos 2k-4 colores. En general, *G* podrá colorearse con k-*v* colores, donde *v* es el número de conjuntos V_i completos y compatibles. Asimismo, en este caso será posible *r*-multicolorear *G* al menos con *r*(*k-v)* colores.

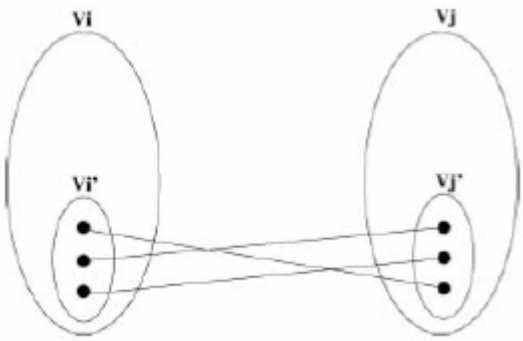


Figura 5.15: Ejemplo de subconjuntos V_i completos con vértices adyacentes V_i.

Cuando el coloreado simple $\Phi(G)$ emplea un número de colores k igual al número cromático no pueden darse casos de subconjuntos V_i completos. De otro modo k no podría ser el número cromático. Igualmente, cuando se trabaja con coloreados próximos a las cotas inferiores del número cromático, tampoco es sencillo encontrar subconjuntos V_i completos. Por otra parte, empleando en la práctica coloreados simples poco restrictivos (es decir coloreados con $k+m$ colores, donde $m \geq 1$), han podido encontrarse conjuntos V_i completos, si bien en ningún caso ha resultado que el número v de conjuntos V_i completos y compatibles fuera mayor que el número m de colores adicionales resultando en definitiva diseños con un número de colores igual a $k+m-v \geq k$. De este modo, no tiene sentido intentar obtener coloreados simples por el procedimiento de emplear diseños poco restrictivos y a continuación buscar conjuntos V_i completos, si bien no hay que olvidar que en algunos puede resultar más sencillo colorear un grafo G con $k+1$ colores y encontrar a continuación un subconjunto V_i completo (problema que no reviste ninguna complicación y que es resoluble en un tiempo proporcional al cuadrado del orden del grafo) que colorear directamente G con k colores.

En el caso en que no existan subconjuntos V_i completos no se podrá colorear directamente el grafo con menos de k colores, a pesar de lo cual podrán reutilizarse colores del primer coloreado para así definir un subgrafo inducido que, según la proposición 5.1, pueda ser coloreado con menos de k colores. Así, si por ejemplo se consiguiera colorear el subgrafo inducido de G con $k-1$ colores, se habría conseguido 2-multicolorear G con un número de colores igual a $2k-1$.

5.3.1 Construcción del Subgrafo Inducido

En el presente apartado se describe un procedimiento para, dado un grafo *G(V,E)* y un coloreado simple Φ(*G*) , construir un subgrafo inducido obtenido de eliminar de *V* los vértices que puedan emplear en el segundo coloreado alguno de los colores del primer coloreado Φ(*G*). Para ello se parte de la matriz *C* definida en el apartado anterior.

Primero de todo, como los vértices correspondientes a filas nulas de la matriz C no pueden reutilizar ningún color, no serán objeto de estudio y por lo tanto las filas correspondientes pueden ser eliminadas. Se define entonces la matriz *C'* de *n'* filas y *k* columnas, resultado de eliminar las filas nulas de *C*.

A continuación, se construye una matriz *D* de *n'* filas y *k* columnas, donde cada elemento d_{ij} es el resultado de sumar a cada $c'_{ij} \neq 0$ todos los c'_{kj} de la misma columna *j* que se corresponden con los vértices *k* adyacentes al vértice *i*, es decir,

$$d_{ij} = c'_{ij} + c'_{ij} \sum_{k} c'_{kj} \quad \forall k \ adyacente\ a\ i$$

De esta manera d_{ij} calcula el número de vértices que pudiendo reutilizar el color *j* son además adyacentes a *i*. La figura 5.16 muestra un ejemplo de construcción de la matriz *D*.

Una vez definida la matriz *D* se puede observar que si alguno de los elementos d_{ij} de una fila *i* es igual a 1, el vértice *i* puede recibir en un segundo coloreado el color *j*, ya que ningún vértice adyacente a *i* podrá reutilizar el color *j*. De este modo, todos los vértices *i* tales que $d_{ij} = 1$ podrán ser doble-coloreados con los respectivos colores *j* (es decir podrán recuperar el primer color de Φ(*G*) más un segundo color j).

$$C' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} 0\,adyacente\,a\,1 \\ 0\,adyacente\,a\,2 \\ 0\,adyacente\,a\,3 \\ 2\,adyacente\,a\,3 \end{Bmatrix} \rightarrow D = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 5.16: Ejemplo de construcción de la matriz D.

De otro lado, las filas que no contienen $d_{ij} = 1$ corresponden a vértices que presentan incompatibilidades con otros en el proceso de reutilizar los colores. Puede construirse entonces una nueva matriz D' resultante de eliminar las filas de *D* que contienen algún

1, y de actualizar los elementos d_{ij} de las filas restantes según las nuevas incompatibilidades (aquellos vértices que tengan asignado un segundo color ya no requerirán otros colores y por lo tanto podrá restarse una unidad en los vértices adyacentes a *i* que requirieran un mismo color *j* que *i*). El hecho de actualizar los elementos d_{ij} de las filas restantes, puede provocar la aparición de nuevos elementos igual a 1 en *D'*. En este caso, se ha de repetir el proceso anterior hasta que no queden 1's en la matriz *D'*, tal y como muestra la figura 5.17.

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow D' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow D' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

Figura 5.17: Ejemplo de construcción de la matriz D' con las adyacencias de la figura 5.16.

Una vez la matriz *D'* sólo tiene elementos nulos o mayores que uno, debe decidirse la combinación de colores que, dada la información contenida en *D'*, puede asignarse a los vértices del grafo. Para cada vértice *i* presente en D' existen varias posibilidades: asignar cualquiera de los colores posibles, correspondientes a elementos d'_{ij} no nulos, o no asignar ningún color. Si no se asigna ningún color, los colores requeridos por el vértice *i* quedan libres para otros vértices adyacentes. En el caso de la figura 5.17 se puede observar que los dos vértices representados, que son adyacentes, pueden ser coloreados con el mismo color. En cualquier caso, debe escogerse un coloreado tal que el subgrafo inducido sea simple de colorear (ya que no todos los vértices presentes en la matriz *D'* podrán finalmente reutilizar un color del primer coloreado).

Esta combinación óptima o casi óptima puede llevarse a cabo de diversas formas:

1. Aplicando un algoritmo combinatorio.
2. Aplicando un algoritmo secuencial.
3. De forma exhaustiva, es decir, examinando todas las combinaciones posibles.

5.3.1.1 Algoritmo Combinatorio

El subgrafo de los vértices representados en la matriz *D'* puede colorearse mediante un algoritmo combinatorio como Hormigas o Simulated Annealing. En este caso, cada

vértice tendría restringido el grupo de colores que puede utilizar con arreglo a la información contenida en la matriz *D'*. Esta solución no explora todos los posibles coloreados, pudiendo en consecuencia no calcular el mejor subgrafo inducido. En todo caso, su aplicación es aconsejable en aquellos casos en que el número de filas de la matriz *D'* sea elevado.

5.3.1.2 Algoritmo Secuencial

De todos los vértices representados en *D'* se coloreará en primer lugar el vértice más favorable conforme a un criterio de optimización. Para ello se define una función de coste tal que, al colorear un vértice *i* de la matriz *D'* con un color *j*, contabiliza de un lado los vértices adyacentes a *i* que no podrán ser recoloreados con el color *j*, y de otro los vértices adyacentes que dejarán de estar afectados por el vértice *i*, dado que *i* liberará el resto de colores que finalmente no utiliza. La figura 5.18 ilustra este procedimiento con un ejemplo, en el cual al colorear con el color 0 un vértice determinado se impide a otro vértice adyacente ser coloreado con el mismo color, pero al mismo tiempo se liberan los colores 3, 5, 7 y 8 en el sentido de que podrán ser utilizados por otros vértices (el vértice *i* habrá dejado de requerirlos puesto que ya tendrá asignado un segundo color) quedando la función de coste *f* como,

$$f = [(2-1)]-[(4-1)+(6-1)+(5-1)+(7-1)]=-17$$

	color	0	1	2	3	4	5	6	7	8
		.								
		.								
		.								
vértice i		2	0	0	4	0	6	0	5	7
		.								
		.								
		.								

Figura 5.18: Evaluación de la función de costo del método secuencial.

Una vez calculadas todas las funciones de coste se escoge el vértice *i* con costo mínimo (que tomará el color *j* tal que d_{ij} sea mínimo y diferente de 0), se elimina la fila *i*

de la matriz *D'* y se actualizan los elementos correspondientes a otros vértices afectados de la siguiente manera:

- Por un lado, todos los elementos de la columna *j*, correspondientes a vértices adyacentes al vértice *i* se ponen a cero ya que ninguno de estos vértices podrá utilizar el color *j* (esta actualización puede producir nuevas filas nulas, que también deberán eliminarse).
- De otro lado, se resta una unidad a los elementos correspondientes a vértices adyacentes que requerían alguno de los colores que no ha utilizado el vértice *i* (esta actualización puede inducir la aparición de elementos iguales a 1 en la matriz, permitiendo así el coloreado de los vértices correspondientes).

El proceso de evaluación de la función de coste se repite a continuación con los vértices restantes. A continuación se vuelve a eliminar el vértice con costo mínimo y así sucesivamente mientras queden filas en la matriz.

5.3.1.3 Algoritmo Exhaustivo

El algoritmo exhaustivo busca el coloreado de los vértices de *D'* que conduzca al subgrafo inducido más favorable según uno o varios de los siguientes criterios:

1. Minimizar el número de vértices del subgrafo inducido (es decir, maximizar el número de vértices de *D'* coloreados).
2. Minimizar el número de aristas del subgrafo inducido.
3. Minimizar la densidad del subgrafo inducido.

En principio, y dado que la dificultad de colorear un grafo está relacionada con la densidad, el tercer criterio puede parecer el más conveniente. Ahora bien, si se escoge como criterio único la densidad, el algoritmo tiende a aumentar el número de vértices del subgrafo inducido a cambio de poder minimizar su densidad, añadiendo así vértices “redundantes" (de grado reducido) que en realidad no facilitan el coloreado del subgrafo, a pesar de disminuir la densidad.

De este modo, se ha optado por escoger el coloreado que conduce al subgrafo inducido con mínima densidad del subgrafo de entre los que tienen mínimo número de vértices. De otro lado, dado que para un número fijo de vértices es lo mismo minimizar el número de aristas totales del subgrafo que minimizar la densidad, se ha optado por escoger el

subgrafo con mínimo número de aristas, de entre los que tienen mínimo número de vértices.

Para analizar todos los posibles coloreados de los vértices de *D'*, el algoritmo ha de ser recursivo, de tal modo que evalúe la función de coste para cada uno de los coloreados, quedándose con la mejor combinación en cada iteración.

5.3.2 Algoritmo de Reciclado

Reuniendo lo descrito en los apartados anteriores se ha definido un algoritmo de reciclado capaz de 3-multicolorear (y más genéricamente de *r*-multicolorear) un subconjunto de vértices de un determinado grafo, reutilizando para ello colores incluidos en un 2-multicoloreado. El funcionamiento del algoritmo se resume en la figura 5.19.

En primer lugar, el algoritmo de reciclado construye la matriz *C* a partir de un coloreado doble Φ(*G*) de *G*. A continuación se comprueba si existe algún subconjunto V_i completo.

Si existe algún subconjunto V_i completo o varios subconjuntos V_i completos compatibles, se modifica el color de los vértices de los distintos subconjuntos V_i obteniéndose un nuevo coloreado más restrictivo que el anterior y reconstruyendo la matriz *C* con arreglo al nuevo coloreado.

Inicio
Construir matriz C
    si (no existen subconjuntos de V_i completos)
    construir matriz C'
    construir matriz D
    construir matriz D'
    fin si
guardar vértices coloreados
construir subgrafo inducido
colorear subgrafo inducido

Figura 5.19: Algoritmo de Reciclado.

A continuación se construyen las matrices *C', D y D'* a partir de la matriz *C*. Una vez refinada la matriz *D'* se colorean los vértices correspondientes con el método exhaustivo o con el algoritmo secuencial. Finalmente se construye el subgrafo inducido (de eliminar

de *G* los vértices con un tercer color asignado) y se colorea con las técnicas algorítmicas descritas en los capítulos anteriores.

5.3.2.1 Algoritmo rcy para el 3-coloreado

Como se ha comentado al principio, el objetivo de este TFC es encontrar una serie de algoritmos que permitan conseguir un tercer coloreado a partir de la reasignación de frecuencias previamente definidas en la red. Es decir, obtener un grado más a partir del anterior. De hecho, el procedimiento es el mismo que el de la figura 5.19 pero matizando y redefiniendo algunos de los pasos internos en la programación de las matrices. Por lo tanto, podríamos generalizar este esquema para cualquier r-coloreado considerando los siguientes aspectos:

- Comprobar que cada vértice ha sido previamente coloreado con r-1 colores.
- Guardar todos aquellos vértices que puedan ser reutilizados, a partir de la construcción de las matrices C, C' y D.
- Construir la matriz D' para poder aislar aquellos vértices que no se pueden aprovechar directamente un color.
- Aplicar el algoritmo secuencial o el exhaustivo para colorear el resto de vértices posibles de tal manera que el subgrafo inducido tenga el menor número de ramas de entre los que tienen un mínimo número de vértices.
- Guardar estos vértices con el color reciclado.

Capítulo VI

Asignación Múltiple de Frecuencias en Redes GSM

Introducción

Las redes GSM pueden modelarse por grafos cuyas aristas están etiquetadas con números enteros (en algunos casos números reales), correspondiéndose el peso o etiqueta de cada arista con los elementos de la matriz de restricciones.

De otro lado cada celda trabaja normalmente con más de una portadora de modo que el proceso de asignación frecuencial se puede plantear en términos de un multicoloreado de grafos. De este modo, y así como en el capítulo anterior se ha traducido el problema de asignación múltiple en un problema simple de coloreado a través del desdoblamiento de cada celda en un número determinado de vértices, en el presente capítulo se ha resuelto el problema de modo directo, es decir, sin transformar el grafo inicial y trabajando con vértices a los cuales debe asignarse más de una frecuencia o color. Al final del capítulo se comparan ambos procedimientos.

6.1 Asignación de Frecuencias Mediante Coloreado de Grafos

Dado que el grafo que representa una red GSM tiene las aristas etiquetadas deberán en primer lugar redefinirse (si bien sólo de forma puntual) algunos de los operadores descritos en el apartado anterior. De los mecanismos estudiados deben considerarse los siguientes:

- El primer coloreado del grafo.
- La repetición de un coloreado *r* veces.
- La reutilización de colores.
- El coloreado del subgrafo inducido.

En cuanto al coloreado simple del grafo se seguirán los mismos procedimientos descritos en los capítulos anteriores. En el caso de repetir *r* veces un coloreado de *k* colores para obtener así un *r*-multicoloreado de un grafo *G* con pesos en las aristas, no se puede asegurar que el número total de colores utilizados sea *rk*. Es decir, si el primer coloreado va de 1 a *k* colores, el segundo de *k+1* a *2k* colores y así sucesivamente, puede suceder que vértices que tienen asignado el color l *k* (del coloreado l) sean adyacentes a vértices que tienen asignado el color l *k* +1 (del coloreado l +1), y que la

arista adyacente a ambos vértices tenga un peso $p>1$, de modo que el multicoloreado final no sería correcto. De este modo, es necesario introducir un desplazamiento d entre los coloreados tal que $d=p_m$ -1 donde p_m es el peso máximo de alguna de las aristas del grafo.

De esta manera, el primer coloreado irá del color 1 al color k, el segundo de $k+1+d$ *a* $2k+d$, el tercero de $2k+1+2d$ *a* $3k+2d$ y así sucesivamente. En el presente proyecto, no obstante se han considerado inicialmente grafos con ramas de peso 1.

De otro lado, en el caso en que se multicoloree el grafo repitiendo el primer coloreado hay que considerar que el grafo no modela los elementos de la diagonal principal de la matriz de restricciones, que corresponden a las restricciones entre colores del mismo vértice.

Respecto a la reutilización de colores de un primer coloreado, el algoritmo de reciclado ha de tener en cuenta que:

- Al construir la matriz C los colores de un mismo vértice han de mantener una distancia mínima igual al elemento correspondiente de la diagonal principal de la matriz de restricciones. Asimismo los colores de vértices adyacentes han de mantenerse a una distancia mayor o igual al peso de la arista que los une.
- Al construir la matriz D, cada d_{ij} ha de contabilizar los elementos c_{ij} de vértices adyacentes de la misma columna y de columnas adyacentes hasta una distancia $p-1$, donde p es el peso que une los vértices. En este caso, cada d_{ij} refleja el número de vértices adyacentes que requieren un color del intervalo $([j-(p-1), j+(p-1)]$.
- Al construir y actualizar la matriz D', cuando se elimina una fila y se libera un determinado color k, el cambio afecta a los vértices adyacentes que requieren un color del intervalo $[j-(p-1), j+(p-1)]$.

Finalmente, se ha implementado un método para 3-multicolorear grafos (que puede extrapolarse sin dificultades al caso de r-multicoloreado) que integra los algoritmos descritos en los apartados anteriores, es decir: algoritmos para el coloreado simple de grafos (Hormigas y Simulated Annealing), algoritmos de reutilización de colores (desarrollados a partir de la matriz D') y algoritmo de generación de subgrafos inducidos.

6.2. Implementación

A continuación se describen los algoritmos que han sido objeto de estudio en este trabajo de monografía, este es: 3-Multicolorear Grafos. La estructura global de procedimiento, para su ejecución, se describe en la figura 6.1.

Todos los módulos que lo integran se deben de ejecutar mediante el intercambio de una serie de ficheros de datos según el procedimiento mostrado en la figura. En primer lugar, el algoritmo Hormigas o Simulated Annealing realizan el coloreado simple de *G*.

Una vez se tiene el primer coloreado, el algoritmo de reciclado RCY asigna un tercer color a una serie de vértices presentes en la matriz *D',* reutilizando para ello colores del doble coloreado inicial. A continuación MAKE_NET genera el subgrafo inducido formado por los vértices que no han sido triplecoloreados. Finalmente el algoritmo JOIN une los distintos coloreados obtenidos formando así un 3-multicoloreado de *G*.

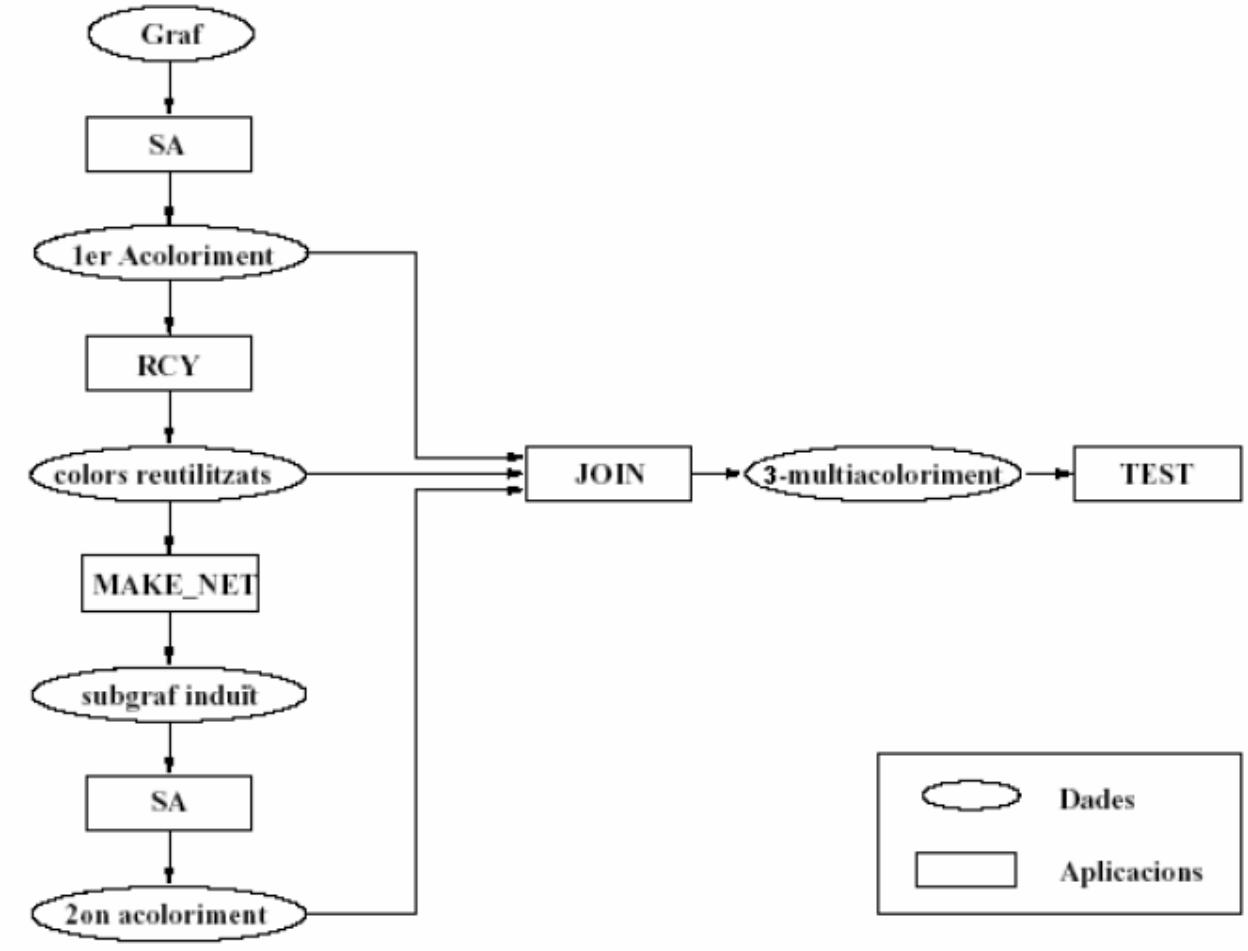


Figura 6.1: Procedimiento para el 3-multicoloreado de un grafo.

El algoritmo JOIN une de este modo el primer coloreado doble de *G*, un segundo coloreado (simple) parcial del mismo grafo reutilizando colores del primero y el coloreado del subgrafo inducido formado por los vértices restantes, para dar lugar al 3-multicoloreado de *G*. Hormigas y Simulated Annealing colorean así en primer lugar *G* con *k* colores que van del 0 al *k-1*, además del subgrafo inducido con *k'* colores del 0 al *k'-1*. De este modo, antes de unir los dos coloreados el algoritmo suma *k* unidades a cada uno de los colores del subgrafo inducido de manera que este comience con un color *k* y termine con el color *k*+*k'* . De otro lado, si quisiera superponerse *r* veces el primer coloreado se ha de tener en cuenta la distancia $d=p_m - 1$ entre coloreados.

Este conjunto de aplicaciones puede ampliarse al caso de *r*-multicoloreados para *r >3* si en vez de partir de un primer coloreado doble se dispone de un *r -1* coloreados, cuyos colores pueden ser reutilizados en la asignación del *r*-ésimo color del grafo. Otra posibilidad consistiría en combinar r-1 colores simples, proceso que se ilustra en la figura 6.2 y que no puede asegurar un *r*-multicoloreado óptimo ya que los conjuntos de vértices eliminados para cada uno de los primeros coloreados pueden ser no disjuntos o no estar repartidos de forma óptima (en el sentido de proporcionar un subgrafo inducido de orden y tamaño mínimos).

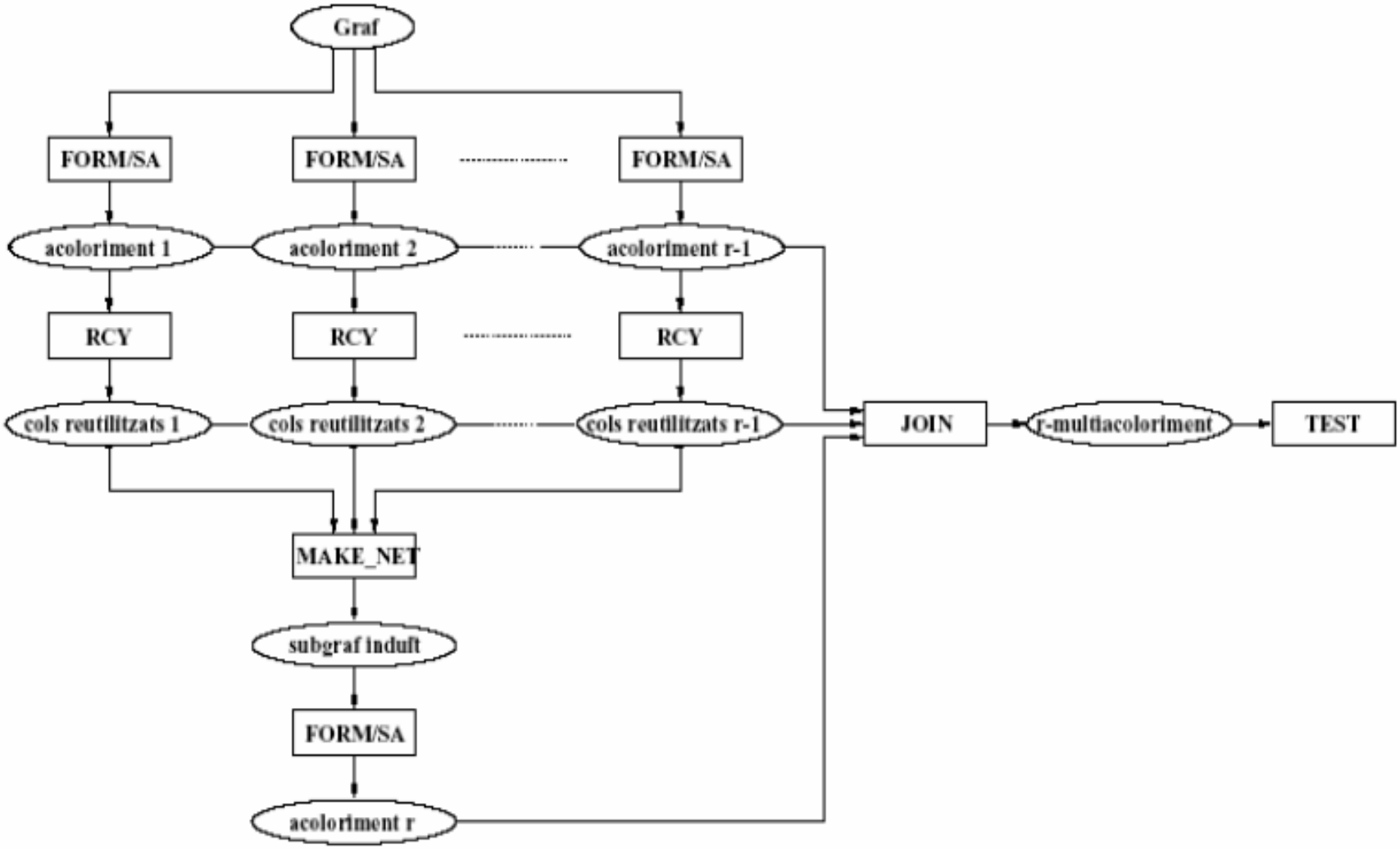


Figura 6.2: Procedimiento para el *r*-multicoloreado de un grafo.

El ejemplo de la figura 6.3 desarrolla el 4-multicoloreado del ciclo C_9, cuyo número multicromático es $X_4(C_9)=9$. Puede así observarse que el número de colores necesarios para multicolorear C_9 según el esquema de la figura 6.3 depende de la distribución de los primeros coloreados. De este modo, si los primeros diseños son los mismos, los colores reutilizables de cada uno de ellos caen siempre en los mismos vértices. Esta coincidencia impide que el multicoloreado de C_9 sea óptimo. Por otra parte, si los primeros coloreados de C_9 fueran diferentes y, además, los colores reutilizados en cada uno de los diseños recayeran sobre vértices distintos, entonces el multicoloreado de C_9 podría ser óptimo.

De otro lado, cuando se trabaja con grafos de una cierta complejidad, como los que modelan redes GSM, es difícil determinar la configuración de los coloreados simples obtenidos mediante algoritmos combinatorios. De este modo, en general no podrá garantizarse en estos casos una correcta redistribución de los vértices que reutilizan colores, en el sentido de obtener subconjuntos lo más disjuntos posibles y disminuir así el orden y tamaño del subgrafo inducido resultante.

Es posible asimismo como se ha dicho obtener *r*-multicoloreados de grafos a partir de la superposición de multicoloreados de grado menor que *r*. De este modo, puede determinarse un 11-multicoloreado de un grafo *G* a través de la superposición de un 6-multicoloreado y un 4-multicoloreado (o dos 5-multicoloreados) y la reutilización de colores en un determinado conjunto de vértices (lo mayor posible). Podría generarse así un subgrafo inducido (formado por los vértices que no reutilizarán ningún color) que, una vez coloreado y superponiendo convenientemente el 6-multicoloreado, el 4-multicoloreado y el coloreado simple del subgrafo inducido, devolviera un 11-multicoloreado de *G*.

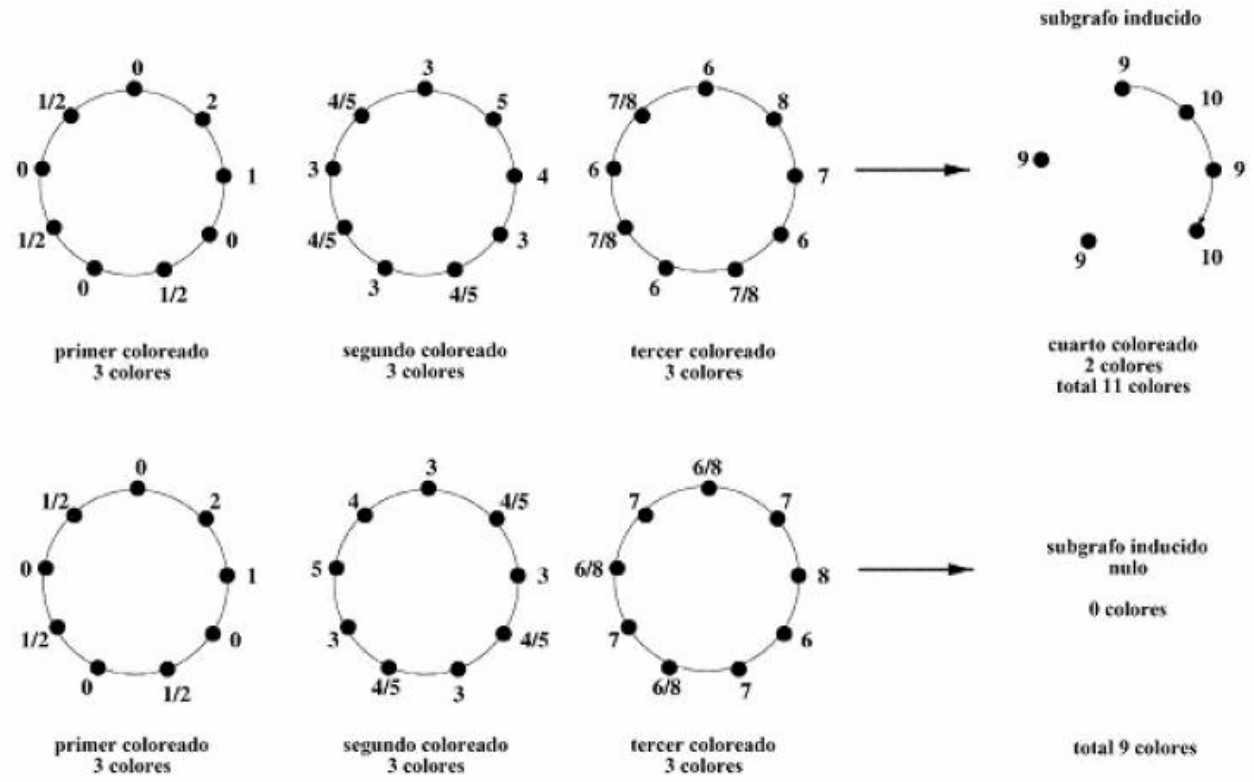


Figura 6.3: Dos ejemplos de 4-multicoloreado de un ciclo de orden 9. En cada uno de los coloreados parciales se indica, en los vértices correspondientes y separados por una barra, el color reutilizado en el cuarto coloreado.

6.3 Comparaciones

A continuación se expone la metodología de cómo evaluar estos algoritmos de coloreado de grafos. Por lo tanto, en este apartado se presentan los posibles resultados de un 3-multicoloreado, bien realizado directamente con uno de los dos algoritmos combinatorios vistos anteriormente (en nuestro caso el algoritmo de Simulated Annealing), bien reciclando colores de los dos primeros coloreados.

Posteriormente se han tomado otras redes aleatorias con un número de celdas elevado para estudiar el comportamiento de estos algoritmos en casos más generales. Hay que decir que las redes se han modelado teniendo en cuenta sólo las interferencias cocanal, por lo que los grafos estudiados no tienen pesos en las ramas.

Por simplicidad, se ha supuesto el caso en que cada celda requiere tres frecuencias aunque, como se ha visto, las técnicas descritas son extrapolables al caso genérico en

que cada celda requiere un número variable de frecuencias. Dado que el principal objeto del presente proyecto es la posibilidad de reutilizar colores, en las pruebas se ha empleado el algoritmo Simulated Annealing –en detrimento de Hormigas– debido a su mayor velocidad de convergencia.

6.3.1 Redes GSM Reales

En primer lugar, consideramos la cota inferior para diferentes valores de redes y número de celdas que son obtenidas mediante el algoritmo *Gusanos*.

	celdas	Cota (un color)	Cota (tres colores)
Red 1	43	13	**39**
Red 2	45	15	**45**
Red 3	90	16	**48**
Red 4	99	15	**45**
Red 5	315	13	**39**

Tabla 6.1: Cota inferior para las redes GSM Reales.

A continuación, en la tabla 6.2 se aprecian los resultados que deben ser obtenidos para: un tercer coloreado (es decir, sin reciclar), un primer doble-coloreado, un reciclado, un nuevo coloreado simple y la unión de ambos.

		RECICLANDO			SIN RECICLAR
	celdas	coloreado doble	coloreado simple	total	triple coloreado
Red 1	43	27	14	**41**	**41**
Red 2	45	30	15	**45**	**45**
Red 3	90	33	16	**49**	**50**
Red 4	99	32	15	**47**	**48**
Red 5	315	27	13	**40**	**42**

Tabla: 6.2: Resultados a obtener para Redes GSM Reales durante un periodo de observación de 20 horas.

Para que estos resultados sean coherentes –es decir, ejecutados bajo las mismas condiciones de simulación– se realiza por cada red el triple-coloreado durante 20 horas. Para el caso de un primer doble-coloreado y un coloreado simple debemos emplear en

conjunto el mismo tiempo. De esta forma, y teniendo en cuenta que el algoritmo es más lento cuantos más colores ha de asignar, empleamos 14 horas para el doble coloreado y 6 horas para el coloreado simple. En estos casos, puede ser considerado como despreciable el tiempo utilizado por los algoritmos RCY, MAKE NET y JOIN porque es muy pequeño frente a las 20 horas de proceso total (según las experiencias practicas, la ejecución de los tres no ocupa más de 5 minutos de cálculo).

En la tabla anterior se observa que el algoritmo encuentra coloreados cercanos a la cota inferior (o clique máximo hallado por el algoritmo Gusanos). En particular, se consigue coloreado igual a la cota inferior en la red 2 (siendo por lo tanto ajustable el grafo que modela la red). En las tres últimas redes, además, el algoritmo de reciclado ha necesitado un número menor de frecuencias que los métodos directos. De otro lado, cuanto más cerca esté de la cota inferior el coloreado del grafo, más difícil será la reutilización de colores y por eso los resultados que se obtienen reciclando y sin reciclar no presentan grandes diferencias.

5.3.2 Redes Generadas Aleatoriamente

En este caso realizamos diferentes pruebas con redes aleatorias. Estas redes pueden tener diferentes probabilidades de interferencia en la matriz de restricciones, de forma que a mayor probabilidad más 1’s tendremos en la matriz, y por lo tanto, mayor será el grado de restricciones. Nos hemos basado en redes de 500 y 300 celdas y tres probabilidades de interferencia entre celdas: 0.1, 0.25 y 0.5. Primero simulamos dos redes para cada una de las tres probabilidades diferentes y para un tiempo de 20 horas tanto para el triplecoloreado como para el doble-coloreado y coloreado simple con reciclado. Los resultados son los siguientes:

		CON RECICLADO			SIN RECICLAR
	celdas	coloreado doble	coloreado simple	total	triple coloreado
Probabilidad 0,5	500	105	41	**146**	**149**
	500	100	48	**148**	**150**
Probabilidad 0,25	500	51	26	**77**	**79**
	500	50	25	**75**	**76**
Probabilidad 0,1	500	25	12	**37**	**37**
	500	24	12	**36**	**36**

Tabla: 6.3: Resultados para redes aleatorias de 500 celdas en un tiempo de 20 horas.

En la tabla 6.3 se observa que para periodos largos de simulación los resultados son mejores empleando el método de reciclado, si bien las diferencias no son muy significativas. En las redes con baja probabilidad de interferencia los resultados son iguales para ambos mecanismos. En las tablas siguientes se muestran pruebas similares desarrolladas, no obstante, sobre un número mayor de redes y un tiempo de ejecución de 30 minutos, con el fin de observar las mejoras que se pueden deducir del hecho de no disponer de periodos prolongados de ejecución.

		CON RECICLADO			SIN RECICLAR
	celdas	coloreado doble	coloreado simple	total	triple coloreado
Red 1	500	26	12	**38**	**37**
Red 2	500	25	13	**38**	**38**
Red 3	500	26	12	**38**	**38**
Red 4	500	25	13	**38**	**37**
Red 5	500	26	12	**38**	**38**

Tabla 6.4: Resultados en un tiempo de ejecución de 30 minutos para redes aleatorias de 500 celdas con una probabilidad de 0.1.

Según los resultados de la tabla 6.4 no resulta rentable emplear mucho tiempo de ejecución en redes con pocas interferencias ya que con sólo 30 minutos se obtienen prácticamente los mismos resultados de la tabla 6.3.

		CON RECICLADO			SIN RECICLAR
	celdas	coloreado doble	coloreado simple	total	triple coloreado
Red 1	500	57	23	**80**	**111**
Red 2	500	58	23	**81**	**109**
Red 3	500	66	20	**86**	**114**
Red 4	500	61	22	**83**	**108**
Red 5	500	61	22	**83**	**111**

Tabla 6.5: Resultados en un tiempo de ejecución de 30 minutos para redes aleatorias de 500 celdas con una probabilidad de 0.25

		CON RECICLADO			SIN RECICLAR
	celdas	coloreado doble	coloreado simple	total	triple coloreado
Red 1	500	131	40	**171**	**223**
Red 2	500	137	33	**170**	**223**
Red 3	500	139	34	**173**	**218**
Red 4	500	143	31	**174**	**227**
Red 5	500	136	37	**173**	**227**

Tabla 5.6: Resultados en un tiempo de ejecución de 30 minutos para redes aleatorias de 500 celdas con una probabilidad de 0.5

En las tablas 6.5 y 6.6, por el contrario, puede apreciarse el mejor comportamiento del algoritmo de reciclado en comparación con Simulated Annealing cuando se dispone de periodos cortos de simulación y la probabilidad de interferencia es considerable. La mejora es de aproximadamente un 25% en promedio. Si comparamos estas dos tablas con la tabla 6.4 se observa que cuando las interferencias superan un determinado grado el algoritmo de reciclado es más eficiente.

En las tablas siguientes se muestran resultados obtenidos con un tiempo de simulación igualmente reducido a treinta minutos para redes aleatorias de 300 celdas.

		CON RECICLADO			SIN RECICLAR
	celdas	coloreado doble	coloreado simple	total	triple coloreado
Red 1	300	18	9	**27**	**25**
Red 2	300	17	9	**26**	**26**
Red 3	300	17	9	**26**	**26**
Red 4	300	18	9	**27**	**26**
Red 5	300	18	9	**27**	**26**

Tabla 6.7: Resultados en un tiempo de ejecución de 30 minutos para redes aleatorias de 300 celdas con una probabilidad de 0.1

Los resultados de la tabla 6.7 son muy similares a los de la tabla 6.4, con la lógica diferencia de que el número de colores empleados es menor debido a la cantidad diferente de celdas. En este caso, además, y dado que las redes son más simples (tienen un menor número de celdas), los diseños con un coloreado directo son mejores que los que emplean el reciclado, tanto para una probabilidad de interferencia de 0.1 como para 0.25 (tabla 6.8). Sin embargo cuando la probabilidad aumenta a 0.5 otra vez los resultados obtenidos de aplicar el algoritmo de reciclado son mejores.

		CON RECICLADO			SIN RECICLAR
	celdas	coloreado doble	coloreado simple	total	triple coloreado
Red 1	300	35	18	**53**	**52**
Red 2	300	35	17	**52**	**52**
Red 3	300	35	18	**53**	**52**
Red 4	300	34	17	**51**	**51**
Red 5	300	35	18	**53**	**51**

Tabla 6.8: Resultados en un tiempo de ejecución de 30 minutos para redes aleatorias de 300 celdas con una probabilidad de 0.25

		CON RECICLADO			SIN RECICLAR
	celdas	coloreado doble	coloreado simple	total	triple coloreado
Red 1	300	69	33	**102**	**115**
Red 2	300	69	34	**103**	**110**
Red 3	300	68	34	**102**	**109**
Red 4	300	69	34	**103**	**110**
Red 5	300	69	35	**104**	**111**

Tabla 6.9: Resultados en un tiempo de ejecución de 30 minutos para redes aleatorias de 300 celdas con una probabilidad de 0.5

De este modo, en general, cuanto mayor es el número de celdas, mayor es el número de interferencias y menor es el período de simulación –es decir, cuanto mayor es la complejidad del problema– más eficaz resulta el mecanismo de reciclado de colores. Por tanto, el método descrito en el presente proyecto resulta conveniente en el diseño frecuencial de redes GSM, que precisamente responden al modelo de gran número de celdas e interferencias descrito en las tablas anteriores.

CONCLUSIONES

El principal objetivo de este proyecto ha sido la descripción de los mecanismo de asignación de frecuencias en Redes GSM, problema que tiene una importancia considerable en telefonía móvil debido al alto costo de utilización del espectro radioeléctrico. Para ello se ha partido de una serie de algoritmos capaces de colorear redes simples: como el algoritmo Hormigas y el algoritmo Simulated Annealing que pueden ser aplicados, con leves modificaciones, para asignar más de una frecuencia en cada una de las celdas de una red, aunque en estos casos el tiempo de ejecución de los algoritmos aumenta considerablemente. Por ello la parte central de este proyecto ha consistido en la redefinición de un algoritmo determinista y de ejecución rápida, llamado RCY, para la asignación múltiple de frecuencias en Redes GSM.

En el apartado “6.3 Comparaciones”, se estableció que el algoritmo RCY ofrece buenos resultados para intervalos cortos de simulación. Por el contrario, cuando el período de ejecución aumenta los resultados obtenidos mediante un triplecoloreado directo o mediante un doble-coloreado y un reciclado con RCY son prácticamente los mismos. Se ha observado que la mayor eficiencia de reciclado se obtiene con las redes de mayor número de celdas y con probabilidades de interferencia elevadas. Por otro lado, a medida que aumenta el número de frecuencias asignadas en cada celda aumenta el número total de frecuencias necesarias para evitar las interferencias, ya que es mucho más complicado reutilizar las mismas frecuencias en celdas distintas.

De este modo, cabe remarcar la eficiencia del algoritmo de reciclaje dado que, aunque precisa de un número mayor de algoritmos para multicolorear las redes (como pueden ser TEST, JOIN o MAKE NET, además del algoritmo Simulated Annealing), obtiene los mismos valores de forma mucho más rápida, sobre todo cuando el número de celdas es elevado.

La reducción del número de frecuencias permite, de esta forma, aprovechar mejor el espectro radioeléctrico y dar servicio a un mayor número de clientes en igualdad de recursos, disminuyendo el volumen de interferencias. Dicha reducción puede tener

también una traducción en el número de equipos de transmisión y por lo tanto en la disminución de los costos.

Todo ello, es independiente de la emisión de potencia de las estaciones base y por lo tanto de los posibles efectos que las radiaciones puedan tener en la salud del consumidor, debido a que el estudio ha considerado minimizar el número de portadoras comunes en celdas contiguas y no la emisión total de señales, parámetro que interesa de hecho maximizar con el objeto de dar servicio al mayor número posible de usuarios.

BIBLIOGRAFÍA

[1] E. Aarts, J. K. Lenstra (ed.), Local Search in Combinatorial Optimization, John Wiley & Sons, Chicester, 1997.

[2] E. Aarts, J. Korst, Simulated Annealing and Boltzmann Machines, John Wiley & Sons, Chicester, 1989.

[3] J. Abril, F. Comellas, A. Cortés, J. Ozón, M. Vaquer, A multi-agent system for frequency assignment in cellular radio networks, *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 49 (No. 5), pp.1558-1565, 2000.

[4] S.M. Allen, D.H. Smith, S. Hurley, Lower bounding techniques for frequency assignment, *Discrete Mathematics*, vol. 197/198, pp. 41-52, 1999.

[5] A. Colorni, M. Dorigo, V. Maniezzo, Distributed optimization by ant colonies, *Proceedings of the first European Conference on Artificial Life Paris*, pp. 134-142, ed. by F.J. Varela and P. Bourgine, MIT-Press-Bradford Books, Massachusetts, 1991.

[6] F. Comellas, J. Ozón, Graph Couloring Algorithms for Assignment Problems in Radio Networks, *Proceedings of the International Workshop on Aplications of Neural Networks to Telecommunications*, pp. 49-56, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1995.

[7] D. Costa, A. Hertz, Ants can colour graphs, *Journal of the Operational Research Society*, vol.48, pp. 295-305, 1997.

[8] A. Gibbons, Algorithmic Graph Theory, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

[9] J. Ozón, Contribución al coloreado de grafos y las redes pequeño-mundo, Tesis Doctoral, Departament de Matemàtica Aplicada IV, UPC, Barcelona, 2001.

[10] E. Palà, Assignación de frecuencias hopping en redes GSM de Airtel, Projecte Final de Carrera ETSETB, Barcelona, 2001.

[11] Rappaport, S. Theodore: Wireless Communication, principles and practice. Edit. Prentice-Hall. 2da. Ed. Año 2002.

[12] Hernando Rábanos, José María: Transmisión por Radio. Año 2003. ISBN: 8480042958 / 84-8004-295-8.

WebSites

1. http://www.3gpp.org/specification-numbering
2. http://www.etsi.org/WebSite/Standards/StandardsDownload.aspx
3. http://www.tta.or.kr/English/new/standardization/eng_ttastdlist.jsp
4. http://www.ttc.or.jp/e/publish/index.html
5. http://www.ttc.or.jp/e/external_relations/index.html