



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
DE TELECOMUNICACIÓ DE BARCELONA



**Cálculo de las prestaciones de un sistema de telefonía móvil celular
DCA con técnicas de mejora de capacidad**

TESIS DOCTORAL

Tesis Doctoral presentada en la Universitat
Politécnica de Catalunya para la obtención del
título de Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Autor: Jordi Casademont i Serra

Director: Dr. Josep Paradells i Aspas

A la Montsina i l'Aina

AGRAÏMENTS

Voldria agrair a totes aquelles persones que m'han donat suport en el decurs dels darrers anys en la realització d'aquesta Tesi Doctoral.

En primer lloc vull dir que aquest treball ha estat desenvolupat dins les investigacions del grup de Comunicacions Mòbils del Departament de Matemàtica Aplicada i Telemàtica de la Universitat Politècnica de Catalunya, sense la col·laboració del qual no hagués estat possible. Menció especial mereix Josep Paradells qui, amb el seu recolzament i motivació, ha contribuït decisivament a que aquesta Tesi veies la llum.

Cal dir que part d'aquest treball ha estat fruit d'un conveni de col·laboració del Departament amb Alcatel SESA a qui voldria agrair la seva aportació d'idees.

Haig de mencionar també la tasca desenvolupada pels dos estudiants que han realitzat el seu projecte final de carrera dins el marc d'aquest treball: Jordi Ferrer i Jordi Oriol.

Per últim voldria fer extensiu el meu agraïment a tots els professors del departament que mai m'han negat la seva ajuda.

RESUMEN

El objetivo que ha motivado esta tesis ha sido el analizar y proponer mecanismos para incrementar la capacidad de tráfico de un sistema de acceso radio DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) en entornos de exteriores, particularmente en los servicios de bucle de abonado vía radio y CTM (Cordless Terminal Mobility).

El DECT fue diseñado en un principio para trabajar en entornos de interiores con alta capacidad de tráfico y calidad de voz comparable a un teléfono con hilos. Sin embargo, cuando el sistema debe operar en exteriores las condiciones de propagación cambian radicalmente y no se consiguen los mismos rendimientos que en interiores. Dentro de edificios se aprovechan las atenuaciones de paredes, techos y otros objetos para tener un gran reuso de los canales, el principal problema que presentan los escenarios de exteriores es que las señales interferentes se propagan con mucha más facilidad y la interferencia generada por el propio sistema limita su capacidad.

En la tesis se presentan cuatro tipos de resultados analizados mediante un simulador software. El primer grupo está enfocado a incrementar la capacidad del sistema de bucle de abonado vía radio utilizando antenas directivas, control de potencia, arrays adaptativos y la posibilidad de que las estaciones base transmitan información de cuales son sus canales menos interferidos. El segundo tipo de resultados evalúa las prestaciones de la aplicación de CTM con usuarios móviles y diferentes posiciones de las estaciones base. El tercer tipo analiza técnicas que maximizan la eficiencia de los recursos más que la capacidad de tráfico, se han utilizado repetidores y antenas distribuidas. El último grupo de resultados examina al sistema de bucle de abonado en condiciones adversas de tráfico no uniforme y con dos operadores trabajando en la misma zona sin estar sincronizados.

La última parte de la tesis presenta un cálculo analítico aproximado de la probabilidad de outage para sistemas FCA (Fixed Channel Allocation) y su extensión para sistemas DCA (Dynamic Channel Allocation), como el DECT. Para verificar el buen comportamiento de la aproximación en sistemas DCA, se ha comparado el cálculo analítico con resultados extraídos de simulaciones en entornos de bucle de abonado vía

INDICE

CAPITULO 1. Introducción	1-1
1.1. Bucle de abonado vía radio y terminal sin cordón con movilidad	1-2
1.2. Sistemas de comunicaciones móviles celulares	1-4
1.3. Motivación, objetivos y contribuciones de esta tesis	1-5
1.4. Desarrollo de la tesis	1-7
CAPITULO 2. Bucle de abonado vía radio	2-1
2.1. Concepto de bucle de abonado vía radio	2-2
2.1.1. Bucle de abonado con hilos	2-3
2.1.2. Bucle de abonado vía radio	2-3
2.1.3. Ventajas y desventajas del bucle de abonado vía radio	2-4
2.2. Arquitectura bucle de abonado vía radio	2-6
2.3. Requerimientos del servicio de bucle de abonado vía radio	2-7
2.4. Tecnologías que pueden dar servicio de bucle de abonado vía radio	2-8
2.4.1. Sistemas sin cordón	2-9
2.4.2. Sistemas celulares	2-10
2.4.3. Sistemas punto a multipunto con microondas	2-11
2.4.4. Tecnología elegida	2-12
2.5. Aspectos económicos	2-13
2.6. Conclusiones	2-15
CAPITULO 3. Terminal sin cordón con movilidad (CTM)	3-1
3.1. Niveles de movilidad en el bucle de abonado vía radio	3-2
3.2. Arquitectura del CTM	3-3
3.3. Requerimientos de servicio de una aplicación de CTM	3-4
3.4. Tecnologías que pueden dar servicio de CTM	3-4
3.5. Conclusiones	3-5
CAPITULO 4. Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT).....	4-1
4.1. Entornos de aplicación	4-2

4.2. Características y capacidades básicas	4-2
4.3. Arquitectura del sistema	4-3
4.4. Arquitectura de protocolos	4-5
4.4.1. Capa física	4-6
4.4.2. Capa de control de acceso al medio	4-7
4.4.3. Capa de control del enlace de datos	4-11
4.4.4. Capa de red	4-11
4.4.5. Entidad de gestión	4-12
4.5 Conclusiones	4-13
CAPITULO 5. Caracterización del canal radio	5-1
5.1. Propagación radio	5-1
5.1.1. Mecanismos de propagación	5-2
5.2. Modelos de pérdidas de propagación	5-3
5.2.1. Modelos de propagación para microcélulas	5-4
5.3. Conclusiones	5-5
CAPITULO 6. Evaluación de un sistema DECT utilizado en exteriores	6-1
6.1. Caracterización del simulador	6-2
6.2. Modelado del estándar DECT	6-5
6.2.1. Criterios de calidad del sistema	6-8
6.2.2. Fuentes de interferencia	6-10
6.3. Modelado del escenario de simulación	6-11
6.3.1. Area de simulación y nomenclatura utilizada	6-11
6.3.2. Parámetros del sistemas.....	6-12
6.4. Evaluación del modelo utilizado para la simulación del bucle de abonado vía radio	6-15
6.4.1. Parámetros críticos	6-16
6.5. Capacidad del estándar DECT utilizado como sistema de bucle de abonado vía radio	6-26
6.5.1. Utilización de antenas directivas	6-29
6.6. Técnicas de control de interferencia para un sistema de bucle de abonado vía radio	6-35
6.6.1. Control de potencia	6-35
6.6.2. Acceso a varías estaciones base	6-44

6.6.3. Información de estaciones base	6-50
6.6.4. Arrays adaptativos	6-53
6.6.5. Conclusiones	6-58
6.7. Evaluación del modelo utilizado para la simulación de un sistema de terminal sin cordón con movilidad	6-62
6.7.1. Parámetros críticos	6-62
6.8. Capacidad del estándar DECT utilizado como sistema de terminal sin cordón con movilidad	6-65
6.8.1. Utilización de dos transceptores	6-73
6.8.2. Utilización de antenas directivas	6-74
6.8.3. Análisis de las peores posiciones del sistema	6-76
6.8.4. Terminales con velocidades elevadas	6-81
6.8.5. Conclusiones	6-83
6.9. Mecanismos para mejorar la eficiencia de los recursos de un sistema de bucle de abonado vía radio	6-85
6.9.1. Agrupaciones de estaciones base o antenas distribuidas	6-86
6.9.2. Estaciones repetidoras	6-98
6.9.3. Conclusiones	6-105
6.10. Comportamiento de un sistema de bucle de abonado vía radio en entornos de tráfico no uniforme	6-108
6.10.1. Evaluación del sistema con una zona de alto tráfico de pequeñas dimensiones	6-109
6.10.2. Evaluación del sistema con una zona de alto tráfico de grandes dimensiones	6-116
6.10.3. Aparición simultánea de varias zonas de tráfico elevado	6-119
6.10.4. Conclusiones	6-122
6.11. Efecto de la desincronización de sistemas	6-123
6.11.1. Conclusiones	6-137
6.12. Efecto de la duración de las llamadas: tráfico de datos	6-138
6.12.1. Conclusiones	6-142

CAPITULO 7. Estudio de las características funcionales del DECT

utilizado en exteriores	7-1
7.1. Estudio del comportamiento del sistema	7-2
7.1.1. Distancia entre terminal y estación base	7-2

7.1.2. Potencias recibidas: señal deseada e interferencias	7-4
7.1.3. Calidad de las conexiones: relación C/I y GOS	7-8
7.1.4. Probabilidad de traspaso	7-12
7.2. Probabilidad de bloqueo en establecimiento para un sistema FCA	7-15
7.2.1. Definición de la probabilidad de <i>outage</i> y caracterización de la interferencia	7-16
7.2.2. Modelo de propagación para un entorno celular	7-19
7.2.3. Evaluación analítica de la probabilidad de bloqueo en establecimiento	7-24
7.3. Probabilidad de bloqueo en establecimiento para un sistema DCA	7-29
7.4. Conclusiones	7-38
CAPITULO 8. Conclusiones	8-1
8.1. Conclusiones	8-1
8.2. Líneas Futuras	8-7
ANEXO A. Acrónimos utilizados en el texto	A-1
Acrónimos utilizados en el texto	A-1
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	RB-1
Referencias Bibliográficas	RB-1

1. INTRODUCCION

Una gran parte de la inversión en infraestructura de un operador de telefonía fija debe destinarse al denominado bucle de abonado, enlace que une la central local con el abonado. La forma habitual de realizar este enlace es mediante pares de cobre que viajan en canalizaciones subterráneas o suspendidos en postes telefónicos. En términos mundiales, una red de más de 400 millones de cables de este tipo ha hecho que los grandes monopolios de telecomunicaciones parezcan inexpugnables. Los posibles competidores se instalaron en los servicios donde la infraestructura era más asequible, la telefonía móvil celular y las llamadas a larga distancia. Sin embargo, ahora que la tecnología radio ha avanzado y se ha abaratado suficientemente surge una nueva posibilidad: realizar el bucle de abonado con un sistema radio.

La telefonía fija vía radio hace que resulte más fácil y barato crear nuevas operadoras, pero también ofrece ventajas a las compañías ya establecidas. La substitución de los viejos pares de cobre puede realizarse con nuevos enlaces vía radio que requieren un menor mantenimiento y permiten ofrecer mejores servicios.

Existen dos tecnologías radio básicas para ofrecer este servicio: sistemas celulares y sistemas punto a multipunto con microondas. Una de las ventajas inmediatas de los sistemas celulares es que la infraestructura utilizada para dar el servicio de bucle de abonado vía radio puede reutilizarse para dar servicio de movilidad a los abonados dentro del área de cobertura del sistema.

Actualmente los sistemas de telecomunicaciones están tendiendo a los denominados Servicios de Comunicaciones Personales (PCS: *Personal Communications Services*). Los servicios PCS proveen al usuario de un gran rango de servicios, desde un simple busca-personas a una videoconferencia, pasando por acceso internet o la transmisión de datos y sin importar la ubicación del abonado. Es importante que las nuevas infraestructuras de telefonía radio se diseñen para que puedan proveer estos servicios en un futuro próximo, para ello requieren buena calidad de voz, ancho de banda suficiente para los nuevos servicios, alta capacidad, baja congestión y buena cobertura.

Dentro de los sistemas celulares encontramos dos tipos de tecnologías los denominados sistemas sin cordón y los sistemas celulares de gran cobertura. Los primeros se caracterizan por emitir en baja potencia, células de radios pequeños (microcélulas), alta capacidad de tráfico y canales con velocidades relativamente grandes, del orden de 32 Kbps, que les permiten conexiones de voz de alta calidad. Los sistemas celulares de gran cobertura tienen la ventaja de tener coberturas nacionales pero a costa de utilizar macrocélulas, tener menor capacidad, y de reducir los anchos de banda de los canales, del orden de una decena de Kbps, siendo en este caso la calidad de las conexiones inferior.

Este capítulo se dedica a dar una visión general sobre el bucle de abonado vía radio, la movilidad de los teléfonos sin cordón en áreas limitadas y los sistemas radio que pueden ser utilizados para su implementación. Ello proporcionará los antecedentes para el tema sobre el que versa esta tesis, la evaluación del sistema DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) utilizado en dichos entornos y mecanismos para incrementar su capacidad. El último apartado expone la motivación, objetivos y contribuciones de este trabajo, y describe el desarrollo del mismo.

1.1 BUCLE DE ABONADO VIA RADIO Y TERMINAL SIN CORDON CON MOVILIDAD

El bucle de abonado en un sistema de telefonía consiste tradicionalmente en un par de hilos de cobre. Hasta hace poco el uso de un canal radio para conectar abonados telefónicos estaba casi exclusivamente reservado para hogares en áreas remotas o bien de difícil acceso. Más recientemente, el bucle de abonado vía radio (RLL: *Radio Local Loop*) ha sido utilizado en países con poca penetración telefónica para dotarlos de forma rápida de infraestructura y servicios y a bajo coste.

Los defensores de la telefonía inalámbrica sostienen que la tecnología vía radio es sencilla y suficientemente flexible para fomentar la competencia en telefonía fija, y su coste permite que dar servicio hasta en las áreas menos pobladas llegue a ser rentable. Un operador que desee ofrecer servicio de bucle de abonado vía radio debe instalar una red de estaciones base en la zona. Cuando un cliente solicita el servicio, la empresa instala en el tejado de su residencia u oficina un pequeño transmisor - receptor conectado al aparato telefónico interior que le conecta a la red fija. El equipo es simple y tiene la ventaja que el operador sólo debe instalar estaciones base en las zonas a donde se encuentren los abonados, a diferencia de los sistemas celulares de gran cobertura que deben cubrir zonas donde normalmente no se encuentran los usuarios.

La infraestructura desplegada para ofrecer el servicio de bucle de abonado radio es susceptible de ser utilizada por otra aplicación: el Terminal Sin Cordón con Movilidad (CTM: *Cordless Terminal Movility*). El concepto del CTM es proveer al

abonado de movilidad local dentro de la red fija y es considerado como un valioso nuevo servicio. Un sistema CTM no pretende substituir a los sistemas celulares de gran cobertura sino que los complementa ya que sólo permitirá usuarios a bajas velocidades y su cobertura estará limitada a determinadas áreas.

En una solución CTM, el abonado está provisto de un teléfono digital portátil, el cual podrá ser utilizado dentro o fuera del hogar. Dentro del hogar el usuario se conectará a la estación base interior y a través del bucle de abonado llegará hasta la red fija. Fuera del hogar el abonado utilizará las estaciones base exteriores distribuidas por la zona para dar servicio de RLL, CTM o ambos.

Dependiendo del entorno de aplicación los sistemas RLL y CTM pueden utilizar la misma o diferentes redes de acceso. En una zona residencial, con casas unifamiliares aisladas, con abundantes zonas verdes y calles anchas, las estaciones base estarán instaladas en postes por encima de los tejados de las casas y servirán para los dos sistemas. En zonas urbanas, con edificios de varios pisos, y para aumentar la capacidad de tráfico es posible separar los dos sistemas. Mientras las estaciones base de RLL estarán dispuestas en las azoteas de edificios altos, las del sistemas CTM estarán más cerca de los abonados e instaladas en lugares bajos como postes de farolas o semáforos.

Hoy en día la posibilidad de utilizar enlaces radio para proveer el último segmento de acceso telefónico para un abonado es considerado un factor clave en el desarrollo de las telecomunicaciones por varias razones:

- El bucle de abonado radio es visto como un catalizador para el desarrollo de servicios multimedia y la introducción de nuevos servicios que precisan de más ancho de banda y pueden proveer movilidad al usuario. Para poder suministrar servicios más avanzados que el tradicional servicio de voz se imponen mayores requerimientos en las prestaciones de la red. Y es precisamente en el acceso final donde se encuentra el equipamiento en peores condiciones. Por ejemplo, los servicios de la RDSI-BE (Red Digital de Servicios Integrados de Banda Estrecha) se han diseñado de forma que sean capaces de utilizar la actual infraestructura de pares de cobre, pero tiene que encontrarse en óptimas condiciones. El resultado es que de los accesos finales actuales sólo parte de ellos es capaz de soportar dichos servicios, mientras que en el resto de casos sería preciso volver a cablear a los abonados o realizar inversiones en equalizadores para mejorar los enlaces. Sin embargo, gracias a la rapidez de instalación, el coste y la calidad de los enlaces radio, la posibilidad cada vez más atractiva es realizar dichos accesos con sistemas digitales radio.
- Es también una vía para estimular la competencia en el bucle de abonado. Las tecnologías radio pueden ser consideradas por nuevos operadores de servicio telefónico conmutado como una forma eficiente de competir con el operador histórico, y de esta forma llegar hasta el abonado sin tener que costear grandes inversiones en el cableado de redes. El uso de infraestructuras radio posibilita la instalación de la red de abonado con menor coste y de forma más rápida que una red cableada. Otra

ventaja del bucle de abonado radio es que permite una planificación de la red de distribución más simple porque no es necesario conocer a priori la localización exacta de los abonados, y especialmente de los futuros clientes. Con el solo hecho de añadir más antenas, el operador puede incrementar la capacidad de la red y su cobertura acorde con la demanda, factor que permite una inversión más gradual y basada en el número de abonados.

- El bucle de abonado vía radio contribuye a la disminución del coste global del servicio en ciertas áreas geográficas. La red secundaria de acceso, el último tramo hasta los abonados, representa en cifras redondas una cuarta parte de las inversiones totales en una red de telefonía fija y una gran proporción de estos costos es el trabajo empleado en la instalación [JAG]. El coste de este acceso final se incrementa de forma no uniforme con la distancia, a medida que la distancia entre la central y el abonado crece los costes se disparan [VAL]. La instalación y mantenimiento de redes basadas en tecnología radio son menores que los de redes cableadas, particularmente en áreas con bajas densidades de población ya que son, hasta cierto punto, independientes de la distancia.
- El bucle de abonado vía radio representa un enorme mercado potencial que tiene un marcado carácter estratégico para operadores y fabricantes. En los próximos años se espera una migración significativa hacia los accesos radio [JAV].

1.2 SISTEMAS DE COMUNICACIONES MOVILES CELULARES

De las opciones citadas para implementar el sistema de bucle de abonado vía radio es preferible utilizar un sistema celular a un sistema punto multipunto con microondas. En el capítulo 2 se describen las ventajas e inconvenientes de cada sistema, pero entre otros aspectos el primero permite los posibles servicios de movilidad, mientras que el segundo no. En dicho capítulo también se describen las posibilidades de los sistemas celulares de corto alcance y alta capacidad o largo alcance y capacidad media. De entre las posibles opciones se ha escogido el DECT.

El DECT es un sistema de acceso vía radio a redes de comunicación públicas o privadas, estandarizado por la ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Desarrollado inicialmente para entornos de interiores, en los cuales tiene una alta capacidad y muy buen comportamiento, quiere utilizarse también para otro tipo de aplicaciones en exteriores.

El DECT, sistema MC / TDMA / TDD (*Multiple Carrier, Time Division Multiple Access, Time Division Duplex*), tiene como principal característica la asignación dinámica de canal que realiza el terminal portátil. En sistemas de telefonía

móvil existen dos tipos de asignación de canal, la asignación de canal fija (FCA, *Fixed Channel Allocation*) y la dinámica (DCA, *Dynamic Channel Allocation*).

En la asignación de canal fija, el espectro disponible total se divide en un número de grupos, tantos como el número de células que forman las agrupaciones o *clusters*. Después de pronosticar la densidad de tráfico se confecciona un plan de frecuencias asignando unos determinados canales a cada célula. Este procedimiento garantiza a todo móvil, un cierto nivel de relación señal a interferencia mínimo para cursar la llamada. Sin embargo tiene varios inconvenientes, el primero es su poca flexibilidad, un canal que no se emplea en una célula queda inaccesible por otras que tengan mayores necesidades de tráfico. El segundo, la complejidad de realizar el plan de frecuencias en sistemas microcelulares.

La asignación dinámica de canal permite utilizar todos los canales en todas las células, sólo debe tenerse en cuenta que la relación señal a interferencia del nuevo canal supere el umbral mínimo. Estos sistemas se adaptan mucho mejor a posibles fluctuaciones de tráfico y evitan tener que realizar engorrosos planes de frecuencias, tanto en la inicialización del sistema como en posibles ampliaciones de capacidad. En este último caso basta con instalar nuevas estaciones base y el sistema se adaptará automáticamente. El inconveniente de estos sistemas es que en condiciones de máxima utilización se comportan peor que los que tienen los canales de cada célula previamente asignados.

1.3 MOTIVACION, OBJETIVOS Y CONTRIBUCIONES DE ESTA TESIS

Existe una gran variedad de estudios sobre la capacidad del DECT en interiores [ERI][MUS][PARA] sin embargo no ocurre lo mismo para exteriores. El primer objetivo de esta tesis será la evaluación del comportamiento del DECT utilizado como bucle de abonado vía radio y sus parámetros más representativos. El principal problema que presenta el sistema es que las características de propagación en interiores, donde el DECT tiene un excelente comportamiento, son completamente diferentes a las de exteriores. Ello causa que una alta capacidad de tráfico en el interior de edificios no garantice en absoluto la misma capacidad en espacios abiertos. El motivo principal es que, en interiores, existen multitud de elementos que evitan la propagación de las interferencias. Así, el simple hecho de tener una pared dividiendo dos habitaciones permite la reutilización del mismo canal en ambas. En estos entornos, la señal deseada tiene durante gran parte del tiempo visión directa con la estación base mientras que las interferencias no, por lo que acostumbran a estar mucho más atenuadas. En exteriores, las interferencias no encuentran tantos obstáculos en su propagación y llegan más fácilmente a otros receptores, incrementándoles el nivel de interferencia. La

consecuencia inmediata es que la capacidad del sistema decrece en gran medida, hasta el extremo de no resultar rentable.

Para la evaluación del sistema se ha desarrollado un simulador software que permite estudiar los parámetros más críticos de su funcionamiento y proponer y evaluar modificaciones del estándar para mejorar su capacidad.

Una vez se ha visto que el DECT exportado directamente de interiores a exteriores tiene una capacidad baja debido a las interferencias co-canal, el segundo objetivo de la tesis será buscar métodos para incrementar esa capacidad. Existen diversos mecanismos inmediatos no utilizados en interiores pero que son fácilmente aplicables en exteriores. Es el caso de las antenas directivas, arrays adaptativos y control de potencia. Otro método evaluado, que puede ser utilizado en cualquier entorno, es la opción de que el terminal reciba información de cuales son los mejores canales para la estación base antes de decidir el canal a utilizar en la conexión.

El siguiente objetivo es evaluar el sistema con usuarios móviles en lugar de los terminales estáticos del sistema de bucle de abonado vía radio. Se estudia el comportamiento del DECT en un entorno urbano, formado por calles con distribución cuadrada y la influencia de la posición de las estaciones base y velocidades de los usuarios.

La primera contribución de esta tesis es la obtención de los mejores métodos para obtener la máxima capacidad del DECT en los dos entornos descritos. Sin embargo, pueden darse casos donde el requisito del sistema no sea una alta capacidad sino la máxima eficiencia de los equipos en áreas con baja densidad de usuarios. En este caso se plantea el objetivo de estudiar mecanismos que maximicen la utilización de los recursos en lugar de la capacidad del sistema. La siguiente contribución es el estudio de la utilización de repetidores y de antenas distribuidas.

Hasta este punto se ha estudiado el sistema en condiciones de distribución de tráfico uniforme y con un solo operador dando servicio a una determinada área. No obstante, estas condiciones ideales se darán en escasas ocasiones. Resulta interesante comprobar como se comporta el mecanismo de asignación dinámica de canal en condiciones más extremas. El siguiente objetivo es evaluar el sistema de bucle de abonado vía radio cuando se dan distribuciones de alto tráfico localizadas en áreas reducidas, dentro de una superficie con un tráfico uniforme menor, y ver que realmente un sistema DCA se comporta mejor que uno FCA. Una característica del DECT es que, en determinados países, entre ellos España [MOP], su banda de frecuencias es libre para cualquier usuario, y puede darse el caso de tener varios operadores compitiendo en una misma zona y en las mismas frecuencias. El hecho de que el DECT sea un sistema digital plantea la cuestión de si los diferentes operadores tienen sus sistemas sincronizados o no, en este último caso se propone el objetivo de evaluar las pérdidas de capacidad que este efecto ocasiona.

Los sistemas de asignación dinámica de canal son muy complicados de estudiar analíticamente por su alta variabilidad [HER]. Sin embargo, es posible realizar el cálculo de la probabilidad de bloqueo debida a las interferencias, también denominada probabilidad de *outage*.

Los sistemas FCA se diseñan de tal forma que cualquier terminal tenga siempre una calidad suficiente para cursar la llamada. Sin embargo existen dos características del canal radio que pueden afectar el correcto funcionamiento de los cálculos, los desvanecimientos lentos por sombras y los desvanecimientos rápidos por propagación multicamino. Teniendo en cuenta estos dos factores y sabiendo a que distancia se encuentran las interferencias, es posible calcular analíticamente la función de probabilidad de que un terminal tenga suficiente nivel de relación señal a interferencia para cursar una llamada.

En los sistemas DCA el comportamiento es similar, pero se desconoce la posición de las interferencias. No obstante es posible aproximar que éstas se distribuyen uniformemente sobre el área de cobertura del sistema. En estas circunstancias podemos aplicar los mismos criterios que para sistemas FCA y obtener el resultado analítico de la probabilidad de *outage*. Cabe destacar que para el cálculo de la expresión de dicha probabilidad se realizan ciertas aproximaciones y una de ellas es suponer que se tienen todas las interferencias equidistantes y que solamente afectan las situadas en la primera corona interferente. Para entornos trabajando a máxima capacidad esta aproximación es mejor para sistemas FCA que para DCA. No obstante, cuando los sistemas no trabajan con el tráfico máximo la aproximación resulta mejor en los sistemas DCA ya que las interferencias se reparten de forma más uniforme que en los FCA. La última contribución de la tesis es el cálculo de la fórmula de la probabilidad de *outage* para sistemas DCA y la comprobación de su correcto funcionamiento para el entorno de bucle de abonado vía radio utilizando el DECT.

1.4 DESARROLLO DE LA TESIS

En el primer capítulo se han presentado las bases de las aplicaciones del bucle de abonado vía radio y del terminal sin cordón con movilidad. Se han revisado igualmente conceptos generales de los sistemas de telefonía móvil, con especial incidencia en el que será utilizado por las citadas aplicaciones, el DECT.

En el segundo capítulo se estudian con más profundidad los aspectos relativos al bucle de abonado vía radio. Se hace una comparativa entre el bucle de abonado con cables y vía radio, se presenta su arquitectura física y se destacan los requerimientos que según la ETSI debe cumplir un bucle de abonado vía radio. Posteriormente se evalúan las diferentes tecnologías con las cuales puede realizarse el enlace radio, indicando sus

ventajas e inconvenientes, y se escoge el que más se adecua al entorno deseado. Finalmente se discuten algunos aspectos económicos del RLL.

En el tercer capítulo se introduce el concepto de terminal sin cordón con movilidad y se presenta su arquitectura física. A continuación se discuten los servicios que debe proveer al usuario y los requisitos que deben cumplir los sistemas utilizados para su implementación.

El cuarto capítulo versa sobre las características más relevantes del DECT. Al ser el sistema de acceso radio bajo estudio se ha creído oportuno profundizar más en sus detalles técnicos. Primero se exponen sus características básicas y los entornos de utilización. Posteriormente, se presentan las arquitecturas física y de protocolos, discutiéndose sus tareas y los procedimientos de funcionamiento necesarios para el modelado del simulador.

En el quinto capítulo se presentan los mecanismos de propagación radio y diversos modelos utilizados para su predicción. Primero se ofrece una visión general y después se centra el tema en los modelos que más se adaptan a los escenarios a evaluar, sistemas de telefonía sin cordón, en microcélulas urbanas y suburbanas.

En el sexto capítulo se exponen los resultados de las aportaciones de esta tesis. Primero se discute el modelado del DECT mediante simulación software y se evalúan las cuestiones y parámetros más críticos que pueden afectar a los resultados finales. Se estudia su capacidad como bucle de abonado vía radio y se llega a la conclusión de que son necesarios mecanismos de control de interferencias para incrementarla. Se propone y se evalúa el uso de antenas directivas, control de potencia, arrays adaptativos y la distribución, por parte de las estaciones base, de información de sus mejores canales. A continuación se evalúa el escenario de terminal sin cordón con movilidad en un entorno urbano, con terminales estáticos y móviles, y se propone la mejor posición de estaciones base. Seguidamente se buscan mecanismos que en lugar de aumentar la capacidad del sistema de RLL, maximicen la utilización de los recursos disponibles; se estudia el uso de repetidores y antenas distribuidas. Finalmente, una de las características básicas del DECT es que puede adaptarse a entornos de tráfico cambiantes y que no requiere distribución de frecuencias entre sistemas operando en la misma área. El siguiente punto a evaluar es en consecuencia su comportamiento en estas circunstancias, distribuciones no uniformes de tráfico y co-existencia de dos sistemas no sincronizados.

En el séptimo capítulo se presentan primero las distribuciones de los principales parámetros de funcionamiento del sistema de RLL utilizando el DECT. En el capítulo anterior se hacía hincapié en el grado de servicio y capacidades del sistema pero no se estudiaba el comportamiento de interferencias, relación señal a interferencia, distancia entre estación base y terminal, etc. Posteriormente, se calcula la probabilidad de bloqueo debida a interferencias en un sistema de asignación fija de canal y se extiende su aplicación a un sistema de asignación dinámica de canal. Para comprobar su validez se

compara el resultado analítico con el obtenido a través de simulación en el entorno de bucle de abonado vía radio utilizando el DECT.

En el octavo capítulo se analizan las conclusiones extraídas de los capítulos anteriores, remarcando los puntos más importantes de este trabajo de investigación, el cumplimiento de los diversos objetivos propuestos y las aportaciones realizadas. Finalmente se proponen las líneas de actuación que quedan abiertas.

Finalmente se adjunta un anexo con los acrónimos utilizados en el texto.

2. BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

Desde su introducción en 1885 hasta muy recientemente, la red telefónica ha venido utilizando circuitos de cobre para conectar el teléfono ubicado en casa del abonado a la central local; este enlace se denomina “bucle de abonado”. En la década de los años ochenta, la llegada de teléfonos sin cordón analógicos de bajo coste permitió la ruptura del cordón telefónico dentro de las casas de los abonados, pero sólo para distancias cortas entre el microteléfono y la estación base conectada a la roseta. Al mismo tiempo y en algunos casos de abonados rurales muy aislados, para realizar el bucle de abonado se estaba utilizando radio en lugar de cables de cobre. Sin embargo, la posibilidad de utilizar radio para realizar el enlace entre la central local y los abonados de forma masiva no surgió hasta finales de la pasada década en que la tecnología radio avanzó y se abarató. De esta forma apareció la alternativa al bucle de abonado cableado, el “bucle de abonado vía radio” [PRA].

El coste del acceso final crece de forma no uniforme con la distancia. Por ello no es de extrañar que el servicio telefónico se haya extendido mucho más despacio en el mundo rural que en las grandes urbes. Desde el punto de vista del operador, la solución más lógica consistiría simplemente en privar del servicio telefónico a abonados lejanos y dispersos, puesto que los ingresos derivados de esos pocos abonados no justificarían, en modo alguno, las inversiones a realizar. Esta ha sido una de las razones por las que, tradicionalmente, los operadores de red han sido monopolios estatales, intentando garantizar un servicio telefónico universal. Puesto que el coste de los sistemas de acceso radio es prácticamente independiente de la distancia, dichos sistemas aparecen como candidatos para facilitar el acceso a abonados remotos. Así pues, cuando en los años setenta empezaron a aparecer los primeros sistemas de acceso radio, una de sus aplicaciones fundamentales fue precisamente la de dotar de servicio telefónico a áreas donde hasta entonces había sido imposible acceder.

Actualmente la radio es considerada por algunos como el medio para romper “el monopolio natural” del que han gozado algunas compañías telefónicas durante las últimas décadas. La competencia en el bucle de abonado, antes imposible por las enormes inversiones necesarias, es ahora una realidad.

Existen dos motivos básicos para las inversiones en el bucle de abonado. La primera, ya comentada, es su instalación para dar de alta nuevos usuarios. La segunda, la necesidad de suministrar servicios más avanzados que el tradicional servicio de voz donde se imponen mayores requerimientos en las prestaciones de la red. Y es precisamente en el acceso final donde se encuentra el equipamiento más antiguo, dañado y de peor calidad. El resultado es que de los accesos finales existentes sólo una fracción de los mismos es capaz de soportar dichos servicios, mientras que en los otros casos sería preciso volver a cablear a los abonados o realizar inversiones en ecualizadores para mejorar los enlaces. Sin embargo, gracias a la rapidez de instalación, el coste y la calidad de los enlaces radio, los enlaces deteriorados también pueden ser substituidos por bucles de abonado vía radio.[VAL].

El número de usuarios del servicio telefónico crece sin parar, y si bien en los países más desarrollados el número medio de teléfonos por habitante supera en media el 50 %, en los no desarrollados no llega al 5 %, según datos de la ITU. El acceso a los servicios de telecomunicación se considera como uno de los estímulos principales para favorecer el desarrollo y economía de los países, por lo que se hace necesario disponer de tecnologías que lo permitan de una manera rápida, sencilla y económica [HUI]. En este caso, el bucle de abonado vía radio es la mejor solución para los países en vías de desarrollo que necesitan un gran despliegue de infraestructura en el mínimo tiempo posible [LOT], [PIT], [WES].

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la introducción de una nueva tecnología en el bucle de abonado vendría justificada por dos razones. En primer lugar, la nueva tecnología debe substituir los viejos componentes que existen en la red para incrementar la relación eficiencia / coste. En segundo lugar, debe permitir la implementación de servicios y aplicaciones totalmente nuevos, ofreciendo al operador una ventaja competitiva.

Este capítulo versará sobre el bucle de abonado sin hilos, se examinará el concepto, sus características y los beneficios que tiene frente al bucle de abonado tradicional cableado. Seguidamente se presentará la arquitectura necesaria para su implementación y las posibles soluciones tecnológicas de sistemas de telefonía radio candidatas para dar este servicio. Nos centraremos básicamente en los sistemas celulares de teléfono sin cordón, que como se verá son los que mayores prestaciones ofrecen. Finalmente, se discutirán los aspectos económicos involucrados en la instalación y mantenimiento del sistema.

2.1 CONCEPTO DE BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

El termino “bucle de abonado” define el medio que conecta el terminal telefónico del abonado con los equipos de conmutación de la red. Existen dos tipos de

bucles de abonado: bucle de abonado fijo, físico o con hilos y bucle de abonado sin hilos, denominado por los organismos internacionales *Radio Local Loop* (RLL) o *Wireless Local Loop* (WLL).

2.1.1 BUCLE DE ABONADO CON HILOS

Convencionalmente éste viene realizándose con pares de cobre que salen de la central local hasta el terminal de abonado y que viajan en forma de cables subterráneos o suspendidos en el aire y sujetos a postes. La gran mayoría son enlaces instalados hace bastante tiempo y que sólo permiten transmisiones analógicas. Su capacidad para transmitir datos suele llegar a los 28.8 Kbps. Sin embargo, si están en buenas condiciones pueden ser utilizados para dar acceso a la Red Digital de Servicios Integrados (RDSI).

Actualmente existen algunas tecnologías de modulación como las xDSL (*x Digital Subscriber Line*) que convierten líneas telefónicas de pares trenzados de cobre en redes de acceso de banda ancha capaces de dar servicios multimedia. Dentro de esta tecnología existen varias categorías con distintos anchos de banda: ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) que permite hasta 6 Mbps en dirección al usuario y 640 Kbps en dirección a la red, y VDSL (*Very high speed Digital Subscriber Line*), hasta 54 Mbps hacia el usuario y 20 Mbps hacia la red. Sin embargo tienen la desventaja de que la longitud del bucle de abonado está limitada, para ADSL la máxima distancia sería de aproximadamente 4 Km mientras que para VDSL es de 1.5 Km. [FOR].

2.1.2 BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

El anteriormente mencionado bucle de abonado con hilos tiene ciertas desventajas y su sustituto ha sido encontrado aplicando tecnologías vía radio. Con el desarrollo de las tecnologías radio la aplicación del bucle de abonado vía radio ha ganado aceptación y se está aplicando en diferente medida en varios países. En la India rural existen proyectos para instalar entre 50,000 y 60,000 bucles de abonado vía radio por año [CHO]; en Rusia, Motorola ha unido fuerzas con la compañía telefónica de San Petesburgo para dar servicio de RLL al 10 % de usuarios [ADV]; en Indonesia la compañía *Hughes Network Systems* está instalando 300 líneas por día [PET]; en Estados Unidos de América más de 10 millones de usuarios subscribieron un servicio de RLL en el último año llegando a la cifra total de 40 millones [MEA].

En la figura 2.1 puede verse un sistema básico de bucle de abonado vía radio. El acceso radio permite básicamente dos alternativas: el bucle de abonado fijo sin hilos, y el acceso sin hilos con movilidad. Para el usuario las principales diferencias están en el grado de movilidad que el sistema le proporciona, el grupo de servicios disponibles y la

calidad que el operador puede garantizar. Para el operador estos dos tipos de servicios tienen bastantes diferencias de funcionamiento [TUT].

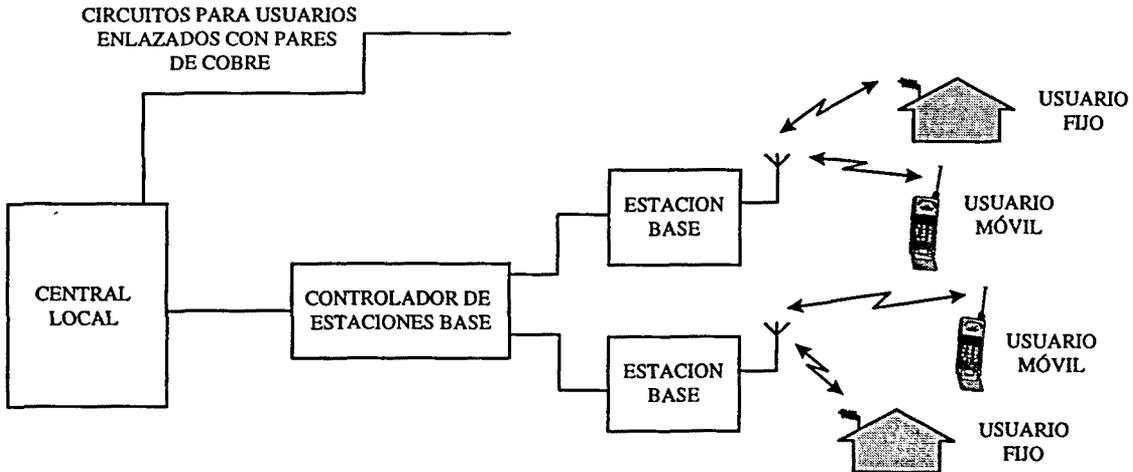


Figura 2.1. Sistema de bucle de abonado vía radio.

En una aplicación de bucle de abonado fijo sin hilos, el servicio ofrecido al usuario es esencialmente equivalente al de las líneas de cobre; aunque el RLL puede utilizarse para dar nuevos servicios al usuario. El equipo remoto ubicado en casa del usuario está formando normalmente por dos componentes una parte radio o estación receptora - transmisora y el equipo telefónico convencional conectado a dicha estación. La parte radio es normalmente propiedad del operador quien se encarga de su operación y mantenimiento. Dependiendo de la distancia a la estación base, estos equipos deben ser instalados en el exterior de la casa del abonado o en su interior.

En el segundo escenario el servicio ofrecido tiene el atractivo valor añadido de permitir cierta movilidad al abonado. En lugar de utilizar un teléfono fijo el usuario puede utilizar un teléfono sin cordón por el área de cobertura del sistema. Con la introducción del sistema de Terminal Sin Cordón con Movilidad o *Cordless Terminal Mobility* (CTM), que será descrito en el próximo capítulo, el usuario podrá moverse a través de las diferentes islas de cobertura de este servicio. En este caso el equipo es propiedad del usuario, quien se encarga de su mantenimiento.

2.1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

Los sistemas de radio en el bucle de abonado aventajan a los sistemas cableados en cobre en muchos aspectos, los principales son:

- La instalación es más rápida que las canalizaciones de cable.

- Un coste inferior al suscribir nuevos usuarios una vez las estaciones base y las interconexiones con la red telefónica conmutada ya han sido establecidas.
- La inversión se puede ir ajustando a la demanda. Conforme la densidad de usuarios aumenta, se van instalando más estaciones radio.
- Capacidad para dar servicio en áreas de difícil acceso.
- El coste de las estaciones base puede ser amortizado antes con una puesta en servicio más rápida.
- Coste prácticamente independiente de la distancia a cubrir.
- El mantenimiento de la red es menor.
- Menor probabilidad de fallo debidos a factores externos como averías en los cables por excavaciones de terceras partes.
- El tiempo empleado en las reparaciones es mucho menor ya que no es necesario llevar el múltiple equipo de localización de las averías en cables, ni pedir permisos a las autoridades locales para excavar en áreas específicas.

Sin embargo también tiene algunas desventajas:

- En los países en vías de desarrollo donde existe el mayor mercado potencial para el RLL el suministro continuo de potencia a las estaciones base no está del todo garantizado, con lo cual en caso de caída de la corriente eléctrica, grupos de usuarios quedarían sin servicio.
- El rápido desarrollo de la tecnología en este campo puede resultar en una rápida obsolescencia de los equipos instalados.
- La carencia de personal técnico calificado en países en vías de desarrollo puede causar problemas en las reparaciones de las estaciones base y equipos de usuario.
- Espectro de frecuencias limitado, ello nos limita el número máximo de abonados en un área determinada.
- En áreas urbanas densamente pobladas, a largo plazo, continúa siendo más económico el cable.

2.2 ARQUITECTURA DEL BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

La ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) en su documento [ETR139] especifica el modelo de referencia de un bucle de abonado vía radio (figura 2.2). El modelo de referencia sirve para definir e identificar los interfaces que requiere un sistema de RLL y cuales pueden basarse en estándares existentes o en preparación.

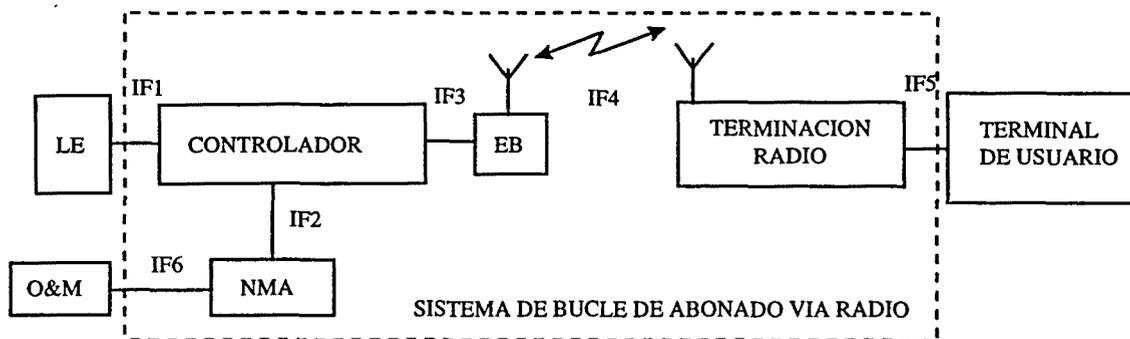


Figura 2.2. Modelo de referencia de la ETSI para un sistema de bucle de abonado vía radio.

En el modelo anterior se identifican 7 componentes y 6 interfaces:

- *Local Exchange* (LE): Representa la red de conmutación fija pública o privada.
- Controlador: Controla las estaciones base y permite su conexión con la red fija.
- Estación Base (EB): Tiene todas las partes radio para recibir y transmitir información de señalización y de usuario de los terminales.
- Terminación radio: Es la parte del equipo de usuario que tiene la habilidad de acceder al interfaz radio.
- Terminal de usuario: Un terminal estándar.
- Operación y Mantenimiento (O&M): Monitoriza y controla el sistema.
- *Network Management Agent* (NMA): Mantiene y trata la información del abonado y los parámetros del sistema y del interfaz radio.

De los distintos interfaces que tiene el sistema el que se pretende evaluar en el presente estudio es el interfaz radio IF4. Este interfaz es utilizado para conectar la terminación radio del abonado con la estación base de la red de acceso a la red fija.

Esta arquitectura puede tener distintas implementaciones [ETR308] que consideran circunstancias como que:

- El equipo “terminación radio” esté dentro de la casa del abonado o fuera.
- Se utilicen estaciones repetidoras en el enlace radio.
- El terminal del abonado sea fijo o móvil.
- Si el terminal de usuario es móvil puede conectarse directamente a la estación base de la red fija o a través de una estación base particular situada en el interior de su casa y ésta a su vez se conecta a la de la red fija.

Asimismo la ETSI describe unas cuantas situaciones clave donde la aplicación del bucle de abonado vía radio es la mejor solución tecnológica para implementar la red de acceso [ETR139]:

- Operadores existentes que quieran dar servicio a una nueva área sin infraestructura.
- Substitución de los cables de cobre obsoletos en áreas rurales.
- Incremento de la capacidad de la red actual.
- Nuevo operador en un entorno competitivo.

2.3 REQUERIMIENTOS DE SERVICIO DEL BUCLE DE ABONADO VIA RADIO

Al igual que hizo con la arquitectura del sistema de bucle de abonado vía radio, la ETSI también estableció una serie de prestaciones y calidades de servicio básicas que debían cumplir los sistemas radio utilizados en su implementación.

En este punto se describen las características que se requieren en un sistema de RLL para que pueda ofrecer un servicio equivalente al acceso convencional mediante cable.

Los servicios básicos que debe ofrecer un sistema de RLL son [ETR139][TUT]:

- Voz telefónica: Es esencial que la voz telefónica pueda ofrecerse con gran calidad y de forma totalmente transparente. Asimismo, los tiempos de conexión tienen que ser similares a los del bucle de abonado cableado.

- Datos en la banda de voz y fax: El sistema RLL debe soportar todos los módems que trabajan en la banda de voz y que son capaces de operar en conexiones conmutadas aunque es permisible que trabajen a velocidades bajas. En particular se deberían soportar velocidades hasta 9600 bps.
- Líneas dedicadas analógicas: Es un objetivo del sistema RLL el soportar líneas dedicadas ordinarias y de calidad especial a 2 y 4 hilos.
- Servicios digitales: La prioridad principal en este punto es soportar accesos básicos (2B + D) de la Red Digital de Servicios Integrados. No debe ser excluida la posibilidad de dar soporte a conexiones n x 64 Kbps hasta alcanzar un enlace primario de la RDSI. Se considera la opción de que si un canal B es utilizado para el transporte de voz su ancho de banda se reduzca a 32 Kbps en el enlace radio.
- El grado de servicio referido como la disponibilidad estadística del canal de comunicación para un terminal de abonado es recomendable que sea inferior al 1 %, aunque es competencia de cada operador el dar un grado de servicio aceptable a sus clientes.
- Seguridad del canal: Debe existir la posibilidad de transmitir la información de usuario de forma encriptada, aunque su utilización es opcional.
- Autenticación: Una estación base tiene que ser capaz de autenticar un terminal radio, y un terminal radio tiene que ser capaz de comprobar que está accediendo a la infraestructura radio correcta.
- Movilidad: Aunque no sea un requerimiento principal, debe ser considerada la posibilidad que los usuarios puedan tener cierta movilidad dentro del área de cobertura del sistema y de esta forma acceder a la red fija tanto desde dentro de sus casas como desde el vecindario. De todas formas esta movilidad no es del grado de la que ofrecen los sistemas celulares tipo GSM (*Global System for Mobile communications*), IS-95 (*Intermeditate System - 95*), IS-136 (*Intermediate System - 136*).

2.4 TECNOLOGIAS QUE PUEDEN DAR SERVICIO DE BUCLE DE ABONADO VIA RADIO

Existen diversas tecnologías que pueden utilizarse para dar servicio de bucle de abonado vía radio. En este apartado se discutirán las ventajas y desventajas de las tres principales: sistemas sin cordón, sistemas celulares y sistemas punto multipunto con microondas.

2.4.1 SISTEMAS SIN CORDON

La mayoría de sistemas sin cordón actuales se estandarizaron al mismo tiempo o poco después que la ETSI definiera los criterios para los servicios de bucle de abonado vía radio. Ello provocó que las especificaciones de los primeros intentaran adaptarse al máximo a los requerimientos del RLL. Por lo cual no es sorprendente que las tecnologías sin cordón se adapten muy bien a bucles de abonado vía radio para distancias cortas. En este estudio se discutirá sobre los dos sistemas europeos candidatos a ser utilizados para el servicio el DECT y el CT2 (*Cordless Telephone - 2*), sin embargo existen otros rivales, el PHS (*Personal Handyphone System*) en Japón y el PACS (*Personal Access Communications System*) y PWT (*Personal Wireless Telecommunications*) en Norte América analizados en [YU1] [YU2], que también se ajustan a los requerimientos del RLL y la mayoría de los argumentos nombrados aquí también sirven para estos estándares. Estas características son [TUT]:

- **Calidad de voz:** La calidad de voz ofrecida tanto por el DECT como por el CT2 es comparable a la calidad de un bucle de abonado cableado ya que ambos utilizan codificadores ADPCM (*Adaptative Differential Pulse Code Modulation*) a 32 Kbps. El retardo introducido es pequeño en los dos casos, del orden de 2.5 ms para el CT2 y de 10 ms para el DECT.
- **Datos en la banda de voz:** Ambos sistemas DECT y CT2 permiten la transmisión transparente de datos hasta 4800 bps y fax tipos 2 y 3 hasta 7200 bps [ETR139]. Estos anchos de banda pueden resultar hoy en día insuficientes, pero pueden utilizarse adaptadores de terminal en ambos casos.
- **Líneas dedicadas analógicas** son posibles en ambos casos.
- **Servicios digitales:** El DECT ofrece conexiones multislot que permiten canales bidireccionales de $n \times 32$ Kbps siendo n máximo igual a 12. Si los slots pertenecientes a una misma conexión son consecutivos (doble slot) el tiempo de guarda entre ellos puede aprovecharse para enviar datos adicionales. El CT2 por otro lado permite conexiones bidireccionales de datos de forma asíncrona o síncrona. En ambos casos se consiguen diversos anchos de banda siendo el máximo de 19200 bps en modo asíncrono y de 32 Kbps en modo síncrono.
- **Servicio RDSI:** El DECT es completamente compatible con RDSI. Un doble slot permite un canal B (64 Kbps) protegido, mientras que dos doble slots consecutivos tienen un ancho de banda de 144 Kbps permitiendo un enlace básico de $2B + D$. El CT2 no es compatible RDSI.
- **Seguridad y autenticación:** Ambos sistemas tienen algoritmo de autenticación, sin embargo sólo el DECT tiene un algoritmo de encriptación estandarizado.

- **Movilidad:** La movilidad puede ser una de las razones principales para la utilización del bucle de abonado sin hilos en lugar del bucle de abonado con hilos. Ambos sistemas permiten la movilidad tanto dentro de la casa del abonado como fuera.
- **Alcance de la conexión:** Ambos sistemas transmiten en baja potencia y permiten la utilización de antenas directivas. Para la misma configuración de antenas el CT2 permite un alcance superior en aproximadamente un 50 % al DECT. Ninguno de los equipos utiliza ecualizador en los receptores; el CT2 no tiene problemas de dispersión temporal debido a su baja velocidad de transmisión de portadora (72 Kbps); el DECT, por el contrario es más susceptible a estos problemas ya que su velocidad de transmisión es mayor (1152 Kbps).

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, si se utiliza un sistema sin cordón para el interfaz radio de un bucle de abonado sin hilos el DECT es claramente superior al CT2.

2.4.2 SISTEMAS CELULARES

Las tecnologías celulares actuales están diseñadas para aplicaciones de macrocélulas y capacidades de tráfico restringidas. Así estas tecnologías se adaptan mejor para situaciones de abonados remotos que requieren servicios de RLL en áreas rurales o suburbanas. Densidades de tráfico elevadas exigen microcélulas y sus planes de frecuencias son muy complejos.

El concepto de RLL con tecnologías celulares puede ser beneficioso para los operadores ya que el hecho de ofrecer este nuevo servicio puede atraer nuevos abonados y de esta forma amortizar mejor las inversiones en estaciones base, sobretodo en áreas con poca densidad de usuarios.

Al igual que en el capítulo anterior, de los actuales sistemas celulares, GSM en Europa, IS-136 e IS-95 en América del Norte y el PDC (*Personal Digital Cellular*) en Japón, solamente se discutirá sobre el europeo. En este caso la comparación se realizará con el sistema DECT escogido en el apartado anterior.

Los principales puntos a tener en cuenta en la elección de una tecnología para implementar un sistema de RLL son [ETR139]:

- **Calidad de voz:** La calidad de voz del GSM es inferior a la que provee el bucle de abonado cableado y también el DECT. El retardo es aproximadamente de 90 ms.

- Datos en la banda de voz y servicios digitales: El GSM no permite la transmisión de datos y fax de forma transparente. Para ello se requiere de un adaptador de terminal que soporta servicios digitales de hasta 9600 bps.
- Líneas dedicadas analógicas son posibles.
- Servicio RDSI: El GSM soporta la mayoría de servicios de voz y suplementarios de la RDSI, pero no permite conexiones básicas (2B + D). Permite un canal B ocupando los 8 slots de una portadora.
- Seguridad y autenticación: El GSM está provisto de algoritmos de encriptación y de autenticación.
- Movilidad: El GSM permite movilidad total al abonado.
- Cobertura: Los sistemas celulares tienen una cobertura mucho mayor que los sistemas sin cordón. En el caso del GSM, el estándar prevé células con radios máximos de hasta 35 Km, mientras que el DECT sólo consigue llegar a los 5 Km.
- Asignación de canal: El DECT tiene un mecanismo de selección de canal dinámico que le permite autoadaptarse a las condiciones de tráfico fluctuante y no requiere planificación frecuencial, aspecto a tener en cuenta si se trabaja con micro-células. El GSM tiene un mecanismo de selección de canal fijo que le hace mucho menos flexible.

Las principales ventajas del GSM sobre el DECT es que el primero tiene mucho más alcance, permite una mayor movilidad y ya existen operadores dando servicio de telefonía móvil que podrían reutilizar su infraestructura para dar servicio de bucle de abonado vía radio. Sin embargo, el DECT domina en los puntos de calidad de voz, ancho de banda digital y capacidad de tráfico.

Como conclusión podríamos decir que las tecnologías celulares se adaptan mejor a densidades de usuarios bajas - medias y las tecnologías sin cordón para medias - altas [NOE], [REI]. El entorno que se pretende analizar en el presente estudio es el bucle de abonado vía radio en áreas con relativa alta capacidad por lo que se considera más adecuado el DECT que el GSM.

2.4.3 SISTEMAS PUNTO MULTIPUNTO CON MICROONDAS

Finalmente se considera la aplicación de punto multipunto con microondas (MPMP: *Microwave Point-to-Multipoint*), para aplicaciones de bucle de abonado vía radio. Desde finales de los años 70 están disponibles los sistemas punto multipunto. Estas soluciones permitieron extender el servicio telefónica hasta los abonados remotos

muy rápidamente y a un coste más bajo que con cables aéreos. Aunque estos sistemas tuvieron cierto éxito, las series de fabricación eran limitadas y la planificación de frecuencias difícil. Era preciso realizar costosas instalaciones para cada abonado, por lo que no llegaron nunca a extenderse demasiado. Actualmente el significativo abaratamiento de los equipos y su mayor capacidad y facilidad de planificación han hecho que sean cada vez más utilizados. Sus principales escenarios son zonas poco pobladas y países subdesarrollados sin infraestructura existente. Quizás el mercado más reciente para este tipo de sistemas lo constituyen los nuevos operadores de red que están apareciendo en Europa gracias a la liberación de las telecomunicaciones.

Los sistemas MPMP cumplen los requisitos de calidad y ancho de banda del servicio RLL permitiendo conexiones a 64 Kbps, además de tener un largo alcance, típicamente hasta los 50 Km. En situaciones normales dan cobertura a grandes células con lo que su eficiencia en términos de usuarios / MHz / Km² es pobre comparado con el DECT o GSM. Aunque utilicen modulaciones eficientes, tipo QPSK (*QuadriPhase - Shift Keying*), la voz suele codificarse a 64 Kbps PCM (*Pulse Code Modulation*) [ETR139].

Los sistemas MPMP son, actualmente, poco económicos excepto para aplicaciones de largo alcance por lo que no serán evaluados en el presente estudio.

2.4.4 TECNOLOGIA ELEGIDA

A la vista de todos los aspectos comentados, la mejor solución en cuanto a simplicidad de implementación e incremento de capacidad, calidad de voz, posibilidad de transmisión de datos, compatibilidad RDSI, alta capacidad, coste económico y madurez tecnológica consideramos que es el DECT.

Sus principales puntos débiles son:

- El corto alcance que tiene debido a la poca potencia de transmisión y a la falta de ecualizador en el receptor que no le protege de canales temporalmente dispersivos. Sin embargo, la ETSI en su documento [ETR139] prevé una futura utilización de mayores potencias transmitidas, menores sensibilidades de receptor y el uso de antenas directivas para remediar ambas carencias.
- La pérdida de capacidad que provocan las interferencias co-canal que en interiores eran atenuadas por paredes y techos y en exteriores se propagan con gran facilidad. Este es uno de los principales puntos a evaluar en el presente estudio.

Otro aspecto a tener en consideración es que diversas operadoras, empresas y organizaciones están realizando pruebas piloto para poder medir su capacidad real en diversos escenarios:

- Telecom Italia: En 1995 se instaló bucle de abonado DECT a un total de 1200 usuarios, con posibilidad de tener servicio de movilidad (CTM) [ADV].
- PT Telekom (Indonesia): Un total de 4000 bucles de abonado vía radio DECT se instalaron en la isla de Java [ADV].
- Telenor (Noruega) realizó una prueba piloto de RLL utilizando el DECT en una pequeña comunidad de 9000 habitantes llegando a la conclusión de que el sistema era eficiente [TUT].
- Telefónica de España, junto con Alcatel, Ericsson y Philips eligieron tres áreas de diferentes características en Madrid. Se dio cobertura con más de 100 estaciones base y se llegó a la conclusión de que la tecnología DECT era suficientemente fiable para trabajar en exteriores [PEÑ].
- Pruebas con zonas de alta densidad de tráfico: En [MAN] se publica un estudio de un escenario donde existe gran densidad de tráfico y también se llega a resultados satisfactorios.

2.5 ASPECTOS ECONÓMICOS

La red secundaria de acceso, el último tramo de cobre hasta los abonados, representa en cifras redondas una cuarta parte de las inversiones totales en una red de telecomunicaciones y una gran proporción de estos costes son el trabajo empleado en la instalación [JAG], en algunos casos estos costes pueden incluso llegar al 70 % de la inversión en un área determinada [NOK].

Un factor clave para el operador es el tiempo de amortización de las inversiones en nuevas tecnologías. La viabilidad económica del sistema viene determinada por los beneficios obtenidos por el servicio prestado en relación a los costes totales: costes iniciales, de instalación y de operación y mantenimiento.

El bucle de abonado vía radio aventaja al cableado en prácticamente todo tipo de costes. En los costes iniciales, es más económico instalar las estaciones base necesarias para cubrir una determinada área que canalizar todos los cables requeridos. En los costes de instalación, para el RLL, si el abonado es un terminal sin cordón móvil solamente se le tiene que dar de alta dentro del sistema, si el terminal es fijo debe instalarse una antena en su edificio. En los sistemas con cable debe conectarse el abonado a la red secundaria ya instalada. En este caso los costes son similares. Finalmente, en los costes

de operación y mantenimiento, el mantenimiento de cables es el mayor gasto de los sistemas cableados. Se calcula que se debe destinar aproximadamente un 5 % de los costes iniciales al mantenimiento anual de un cable y el 2.5 % al de un enlace radio [TUT]. Otra característica a tener en cuenta es que el coste del bucle de abonado con cable depende de la distancia, en cambio sin hilos tiene un coste fijo figura 2.3 [PHO], [JAV].

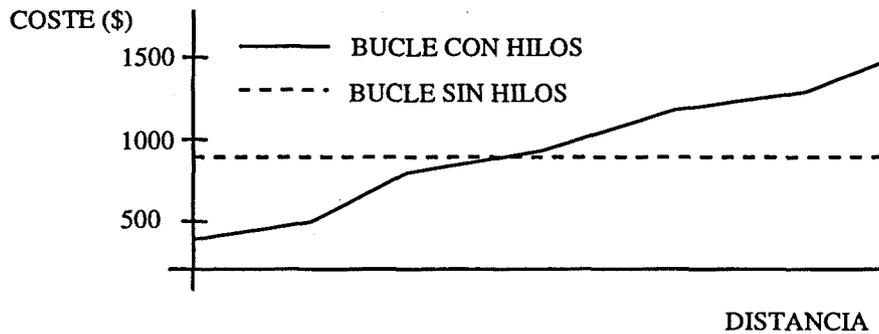


Figura 2.3. Dependencia del coste del bucle de abonado con la distancia entre la central local y el abonado.

De todas formas, el coste total del ciclo de vida de los bucles de abonado cableados también depende en gran medida de la densidad de abonados, mientras que la de los sistemas sin hilos se mantiene prácticamente constante. En la figura 2.4 puede verse gráficamente que a partir de un cierto número de abonados por Km² todavía resulta más rentable instalar bucles de abonado con cable [PRA]. Sin embargo, para los escenarios descritos en el punto 2.3 la densidad de usuarios se situaría dentro del rango en que es más económico utilizar el RLL.

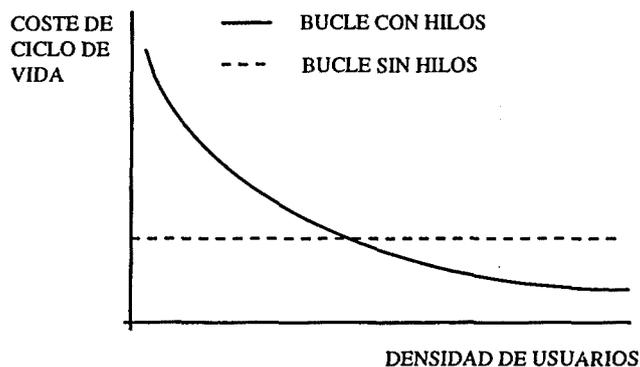


Figura 2.4. Coste del ciclo de vida de un bucle de abonado en relación a la densidad de usuarios de la zona donde se encuentre.

2.6 CONCLUSIONES

La tecnología radio mejora en términos de calidad y capacidad y los costes de los productos continúan cayendo. Es por esta razón que los sistemas radio se sitúan en una inmejorable posición para ser utilizados de forma creciente. Uno de los campos donde tienen un gran futuro es en el bucle de abonado vía radio. Las perspectivas son muy prometedoras [PET] y los organismos de estandarización ya están implementando estándares integrando varios sistemas como el caso de la ETSI con el DECT/GSM para acceder a todo tipo de servicios con un solo terminal.

En este capítulo se han expuesto los requerimientos del bucle de abonado vía radio y se han analizado las tecnologías de comunicaciones radio que podían ajustarse a esas necesidades. Se ha mostrado que los sistemas celulares encajan mejor para áreas con baja densidad de usuarios y con distancias entre estación base y terminal grandes. Por otra parte, los sistemas sin cordón se acomodan mejor a zonas con densidades de usuarios medias - altas y pueden dar una mejor calidad de comunicación que los anteriores.

Por todo ello se ha escogido el estándar europeo DECT para realizar los estudios siguientes sobre la viabilidad que posee éste sistema para ser utilizado en el bucle de abonado. Este sistema fue inicialmente diseñado para interiores y no es trivial que funcione correctamente en entornos de exteriores ya que el modelo de propagación es del todo diferente. En particular se ha comprobado que es un sistema altamente limitado por interferencias co-canal y tendrán que buscarse técnicas para controlar o suprimir estas interferencias.

3. *TERMINAL SIN CORDON CON MOVILIDAD (CTM)*

La primera generación de teléfonos sin cordón analógicos, utilizados en hogares y oficinas tubo una gran aceptación y resultó muy eficiente dentro del radio de cobertura de las estaciones base individuales. Actualmente se calcula que el 50 % de los abonados de USA tiene teléfono sin cordón.

La segunda generación de teléfonos sin cordón, en este caso ya digitales, mejoraron la cobertura, la seguridad, la capacidad de tráfico e incrementaron las posibilidades de nuevos servicios. Una de estas posibilidades era el hecho de que si los terminales accedían a la red a través de una estación base situada en casa del abonado y conectada a la central local a través un cable, también se podía llegar al mismo resultado siendo la propia compañía operadora quien distribuyera las estaciones base. En este caso los teléfonos sin cordón se conectaban directamente a las estaciones base de la operadora, convenientemente distribuidas por el vecindario. De esta forma el usuario puede utilizar su teléfono sin cordón tanto desde dentro de su casa como desde fuera. A este tipo de telefonía se le denominó Terminal Sin Cordón con Movilidad o *Cordless Terminal Mobility* (CTM).

El servicio CTM no prevé dar el mismo grado de movilidad que ofrecen las redes de telecomunicaciones móviles celulares. El servicio CTM está más orientado a dar una buena calidad y servicio en áreas limitadas, que a dar una gran cobertura con calidades menores. Debe ser visto como un servicio complementario básico a la telefonía convencional más que como un competidor para dichas redes celulares.

Este es un servicio ideal para compartir recursos con el servicio de bucle de abonado vía radio. La ETSI en su documento [ETR139] sobre el RLL ya preveía, en 1992, la posibilidad de permitir el movimiento de abonados fuera de sus casas en zonas donde se hubieran instalado estaciones base para dar el servicio de RLL. En esta fecha encargó un estudio sobre la viabilidad del proyecto que llegó a la conclusión de que éste era tecnológicamente viable y empezó a redactar los estándares pertinentes [ETS824].

Sin embargo, la implantación de este servicio por los operadores no es trivial ya que requiere una mayor señalización, proceso y base de datos y en definitiva los servicios de una inteligencia de red, que permita el seguimiento y acceso de los abonados en distintas localizaciones del área de cobertura de la red.

3.1 NIVELES DE MOVILIDAD EN EL BUCLE DE ABONADO VIA RADIO

En muchas ocasiones los operadores estarán interesados en dar el máximo número de servicios con la infraestructura que tengan disponible. Así, los operadores de bucle de abonado vía radio intentarán captar abonados móviles para aumentar las ganancias. Basándose en su infraestructura, el operador podrá diseñar sus servicios, que podrán incluir diferentes niveles de movilidad, aunque algunos de ellos no puedan considerarse RLL.

Los sistemas de comunicaciones móviles pueden dividirse, respecto a la movilidad en dos categorías [ETR308]:

- Sistemas diseñados para alto grado de movilidad (*high-tier mobility*).
- Sistemas diseñados para bajo grado de movilidad (*low-tier mobility*).

En la primera categoría podemos clasificar el GSM, IS-136, IS-95, que son sistemas diseñados con amplias áreas de cobertura donde el usuario pide comunicaciones a nivel mundial y a velocidades superiores a los 100 Km/h. Por otro lado, en los sistemas de bajo grado de movilidad encontramos el DECT, PACS, PWT, PHS, que disponen de células menores, con usuarios lentos aunque permiten capacidades superiores.

El caso que nos ocupa es un sistema de CTM que encaja en la categoría de bajo grado de movilidad. Aquí podemos distinguir tres grados de movilidad más:

- Movilidad en grandes áreas: Hace referencia a aplicaciones telepunto y necesita la colaboración de redes móviles GSM o redes inteligentes, con funciones de movilidad y bastante señalización en la red de acceso radio. Los usuarios pueden moverse entre ciudades y continuar iniciando o recibiendo llamadas. Este caso no es una aplicación de RLL.
- Movilidad en el vecindario: La ETSI [ETR308] define a este tipo de movilidad como la habilidad que tiene el terminal portátil de acceder a los servicios de telecomunicación cuando se encuentra en un área cubierta por varias células (grupo de células cubriendo un vecindario). La movilidad en el vecindario puede ser considerada como un servicio de movilidad del terminal

ofrecido a los abonados del servicio de RLL y equipados con terminales portátiles en las cercanías de un punto geográfico, normalmente esta área se encuentra en los alrededores del hogar del abonado. Este caso puede combinarse con un sistema de RLL.

- Movilidad en una sola célula: Con este tipo de movilidad se permite el movimiento del abonado de RLL dentro de la misma célula en que tiene el acceso fijo. La infraestructura no requiere de ningún tipo de soporte adicional de la red. Este caso siempre es un sistema de RLL.

El tipo de movilidad que se considera en este estudio es el de mayores prestaciones pero que más se adapta a un sistema de RLL, es decir la movilidad de vecindario.

3.2 ARQUITECTURA DEL CTM

La ETSI en su documento [ETR308] especifica el modelo de referencia de un sistema de CTM (figura 3.1). Este modelo difiere del presentado en la figura 2.2 en que existen dos tipos de abonados: el de bucle de abonado vía radio que llama desde el teléfono de su casa y el que utiliza un terminal móvil para acceder directamente a la estación base del sistema. El interfaz radio de los dos tipos de abonados es el mismo.

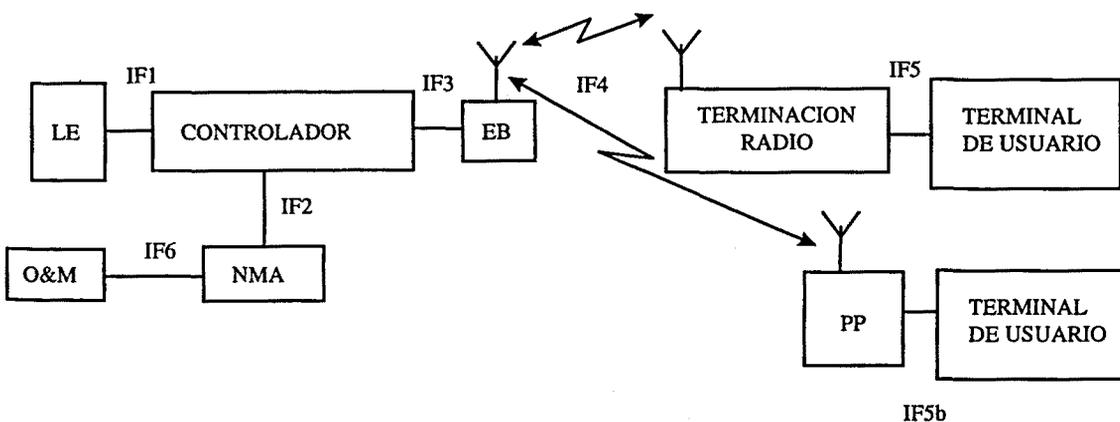


Figura 3.1. Modelo de referencia de la ETSI para un sistema de CTM.

En el modelo anterior se identifican 8 componentes y 7 interfaces:

- *Local Exchange* (LE): Representa la red de conmutación fija pública o privada.
- *Controlador*: Controla las estaciones base y permite su conexión con la red fija.

- Estación Base (EB): Tiene todas las partes radio para recibir y transmitir información de señalización y de usuario de los terminales.
- Terminación radio: Es la parte del equipo de usuario que tiene la habilidad de acceder al interfaz radio.
- Parte portátil (PP): Es el grupo de elementos que permiten la comunicación del terminal de usuario por medio de un estándar radio.
- Terminal de usuario: Un terminal estándar.
- Operación y Mantenimiento (O&M): Monitoriza y controla el sistema.
- *Network Management Agent* (NMA): Mantiene y trata la información del abonado y los parámetros del sistema y del interfaz radio.

De los distintos interfaces que tiene el sistema el que se pretende evaluar en el presente estudio es el interfaz radio IF4. Este interfaz es utilizado para conectar la terminación radio del abonado con la estación base de la red de acceso a la red fija.

3.3 REQUERIMIENTOS DE SERVICIO DE UNA APLICACION DE CTM

En principio, una aplicación de CTM debe ser capaz de soportar los mismos servicios de telecomunicación que un bucle de abonado fijo, con las posibles restricciones que se deriven del sistema radio utilizado. Entonces, aparte de los servicios descritos en la sección 2.3 tendrá, tal y como su denominación indica, el servicio de movilidad, pudiendo cruzar fronteras de células durante una conversación y cuando no se esté en comunicación.

3.4 TECNOLOGIAS QUE PUEDEN DAR SERVICIO DE CTM

El interés que despierta este tipo de servicio viene dado porque puede compartir la infraestructura con un sistema de RLL. Este factor junto con el tipo de movilidad que deseemos dar nos condicionará la tecnología a seleccionar. Ya dijimos anteriormente que una aplicación de CTM no debe ser un sistema de alto grado de movilidad sino más bien de bajo grado y dentro de la clasificación presentada la que se adapta mejor es la movilidad dentro del vecindario.

Al diseñar el servicio de CTM debemos tener en cuenta una serie de aspectos que debería cumplir la tecnología a utilizar [TUT]:

- Uso de microcélulas:
 - incrementa la eficiencia del espectro y permite mayor capacidad de usuarios o mayor ancho de banda por usuario, aspecto a tener en cuenta si se desea incorporar nuevos servicios de telecomunicación multimedia con movilidad [MAY][LOP].
 - Menor consumo de potencia y por consiguiente mayor duración de las baterías.
- Posibilidad de acceder a redes públicas o privadas: Existe una creciente tendencia por parte de las empresas de adquirir sus propios sistemas de telecomunicación para realizar todas las comunicaciones internas de la empresa. Usando estándares compatibles, que puedan ser utilizados tanto en el interior de edificios como en el exterior de edificios, estamos permitiendo el acceso a todo tipo de redes con un solo equipo terminal.
- El uso de la infraestructura existente de las redes públicas fijas: Una forma de abaratar los costos de los nuevos servicios de telecomunicación es el uso de la infraestructura ya existente. En este caso el servicio de CTM debería utilizar un mecanismo de acceso radio a especificar y basarse en las redes fijas ya existentes como red de transporte.
- El uso de funciones de redes inteligentes para realizar el control de los servicios y la gestión de la movilidad.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos la mejor tecnología a utilizar son los sistemas de teléfonos sin cordón digitales. Actualmente existen diversos estándares de telefonía sin cordón: PHS en Japón, PACS y PWT en Norte América y CT2 y DECT en Europa. Respecto a los estándares desarrollados en Europa, ya se comentó en el capítulo anterior que el que ofrece mejores prestaciones es el DECT.

Así pues, en los capítulos posteriores se evaluará la capacidad que tiene el DECT para ofrecer servicios de CTM y la elección de los parámetros que le proporcionan una mejor eficiencia.

3.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha presentado el concepto de terminal sin cordón con movilidad. Se ha visto que es un servicio complementario al bucle de abonado vía radio,

que permite una cierta movilidad al usuario por el vecindario de su casa y que no intenta dar el grado de movilidad de los sistemas celulares. El menor radio de cobertura le proporciona ciertas ventajas sobre dichos sistemas celulares, la principal es que se obtiene un sistema con mayor capacidad, que puede invertirse en proporcionar mayor ancho de banda a los abonados para los nuevos servicios de telecomunicación.

La mejor tecnología a utilizar es tecnología acceso radio que pueda utilizar las redes fijas existentes, actualizadas con las funciones pertinentes para poder gestionar la movilidad de los usuarios. En este marco encajan los sistemas de teléfonos sin cordón. Aunque existen varios estándares de última generación que cumplen los requisitos DECT, PHS, PACS y PWT, se ha escogido evaluar el DECT por ser el estándar europeo.

4. DIGITAL ENHANCED CORDLESS TELECOMMUNICATIONS (DECT)

El estándar *Digital Enhanced Cordless Telecommunications* (DECT) define las especificaciones de un interfaz radio para tecnología de teléfonos sin cordón capaz de soportar una gran variedad de servicios. El proceso de estandarización empezó en 1988 debido al número de teléfonos sin cordón incompatibles entre sí que existía en esa fecha en Europa, y a que éstos solamente satisfacían una parte de las necesidades de los abonados [ETR015]. En el diseño del estándar intervinieron industrias, operadores de telefonía y administraciones estatales coordinados por el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicación (ETSI). De hecho la estandarización todavía no ha terminado y hoy en día continúan saliendo documentos de nuevas extensiones y aplicaciones.

El DECT es una tecnología de acceso radio general para telecomunicaciones sin hilos de corto alcance. Tiene alta capacidad, realiza la cobertura mediante pico-células digitales, de radios entre 10 m y 1 Km dependiendo de la aplicación y entorno de utilización aunque también se prevé la posibilidad de distancias mayores. Da servicios de voz con una calidad equivalente a la telefonía convencional y dispone además de un amplio abanico de servicios de datos, incluyendo la Red Digital de Servicios Integrados. Tiene una potencia de emisión es baja y fue diseñado para que los equipos fueran económicos, su principal característica es la asignación dinámica de canal que le permite operar sin una previa planificación frecuencial.

Cabe señalar las diferencias entre una tecnología de acceso i un sistema de comunicaciones móviles tipo GSM, IS-95 o NMT (*Nordic Mobile Telephone system*). En un sistema de comunicaciones móviles el conjunto de la red forma parte de las especificaciones y el terminal móvil solo puede acceder a la red perteneciente al sistema de comunicaciones móviles. Una tecnología general de acceso se especifica de forma que sirva para acceder a un gran número de redes públicas o privadas. Así la red pública o privada que utiliza el DECT como mecanismo de acceso no forma parte de las especificaciones del DECT.

4.1 ENTORNOS DE APLICACIÓN

Uno de los objetivos principales del estándar DECT fue desarrollar un sistema capaz de operar en gran variedad de entornos, entre ellos los más destacables son:

- **Teléfonos residenciales sin hilos:** Son los teléfonos comunes sin hilos utilizados dentro de los hogares. Su arquitectura más sencilla consta de una estación base conectada a la red conmutada y un teléfono portátil que se conecta con ella.
- **Sistemas de comunicaciones en empresas:** Utilizado dentro de una empresa debe proveer los mismos servicios que centralitas automáticas (PABX: *Private Automatic Branch Exange*), con el valor añadido de que los terminales de usuario conectados a ella son en este caso portátiles. Para operar en entornos de oficinas, donde el tráfico es muy elevado, el sistema deberá utilizar pico-células y tener una alta reutilización de canales. En este entorno existe más de una célula, por lo que el sistema deberá tener funciones de movilidad como gestión de traspasos o localización de los terminales.
- **Servicio de telepunto:** El servicio de telepunto fue originalmente introducido con el estándar CT2 a finales de los años ochenta. El concepto de telepunto es el acceso sin cordón a redes telefónicas públicas a través de estaciones base instaladas por el operador de la red. Pueden cursarse llamadas áreas limitadas, usualmente estaciones de tren, restaurantes o centros comerciales, utilizando el mismo terminal que en aplicaciones residenciales o de oficinas.
- **Bucle de abonado vía radio:** Es la implementación del acceso entre abonado y central local de la red vía radio. Este aspecto ya ha sido ampliamente discutido en el capítulo 2.
- **Acceso radio a redes de área local (WLAN: *Wireless Local Area Network*):** Aparte de los servicios de voz el DECT también permite enviar datos a diferentes velocidades por lo que puede utilizarse esta facilidad para realizar redes de área local sin hilos.

4.2 CARACTERÍSTICAS Y CAPACIDADES BÁSICAS

Para poder operar en todos los entornos mencionados el DECT fue diseñado con unas características básicas que le permiten dar un buen servicio en cualquiera de ellos. Sus principales bazas son que:

- Proporciona una alta capacidad de tráfico (hasta 10.000 Erlangs / Km² / piso en entornos de oficinas y de 250 Erlangs / Km² / piso en entornos residenciales, [ETR043]), utilizando el espectro disponible, tan eficientemente como sea posible.
- Proporciona servicios de voz con una calidad de transmisión equivalente a la de un teléfono cableado convencional.
- Proporciona servicios de datos con diferentes anchos de banda: Permite la transmisión transparente de datos hasta 4800 bps y fax tipos 2 y 3 hasta 7200 bps [ETR139]. Con adaptador de terminal permite tener conexiones simétricas con velocidades de $n \times 32$ Kbps siendo n máximo igual a 12. También se permiten conexiones asimétricas consiguiéndose en este caso velocidades mayores en uno de los enlaces.
- Es compatible con la RDSI.
- Es realizable con un coste ajustado.
- Es flexible para poder ser utilizado en gran variedad de servicios.

4.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El DECT al ser una tecnología de acceso no tiene parte de red. La ETSI en su documentos [ETR178] y [ETR015] describe las partes funcionales del DECT (figura 4.1):

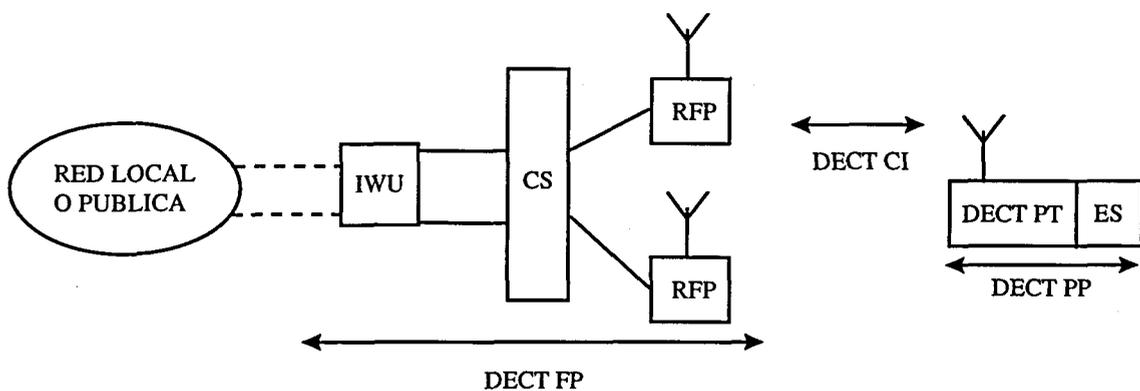


Figura 4.1. Partes funcionales de un sistema DECT.

Un sistema DECT consiste conceptualmente de cuatro partes:

- Parte portátil (PP): consta de la terminación radio (PT: *Portable Termination*) y del sistema final (ES: *End System*). La terminación radio tiene las funciones necesarias para poder establecer conexiones con la parte radio fija y el sistema final los dispositivos de interfaz con el usuario (micrófono, altavoz, teclado y pantalla digital).
- Células de cobertura: En cada célula existe una parte radio fija (RFP: *Radio Fixed Part*) que contiene todas las funciones necesarias para el control y gestión de la célula.
- Sistema Central (CS: *Central System*): Tiene las funciones de gestión necesarias para establecer, mantener y finalizar todas las conexiones del sistema. Debido a que los terminales pueden realizar trasposos entre células se requieren protocolos y funciones de gestión de movimiento, además de las de autenticación, privacidad y gestión de recursos y ancho de banda.
- Unidad de enlace (IWU: *Interworking unit*): Convierte protocolos, formatos y códigos del DECT a los utilizados por la red a la que éste sirve como sistema de acceso: RDSI, Red Telefónica Conmutada, GSM, etc.

El conjunto CS, IWU y RFP forman la parte fija (FP: *Fixed Part*) del sistema DECT.

Para poder implementar los terminales con el mínimo coste éstos solamente tienen las funciones básicas para poder comunicarse con el sistema. Toda la complejidad y traducción de protocolos se deja a las unidades de enlace.

Las primeras especificaciones del DECT estandarizan el denominado Interfaz Común (CI: *Common Interface*). El CI en principio sólo se ocupa del interfaz radio entre la parte fija y la parte portátil. La unidad de enlace (IWU) entre la red local o pública y el sistema central depende del tipo de red y por lo tanto no está especificada en el estándar CI. Tampoco se encuentra en este estándar el sistema final (ES) que dependerá del fabricante. De estas partes solamente se especifican los servicios que tienen que soportar comunicaciones extremo a extremo para requerimientos de compatibilidad, un ejemplo sería la velocidad de la transmisión de voz.

Aparte del interfaz común existen otros perfiles ya en circulación o implementándose y que especifican las partes no cubiertas por el primero. Entre ellos destacan el GAP (*Generic Access Profile*) que especifica la gestión de la movilidad y la interoperabilidad de equipos de diferentes fabricantes y los perfiles de interfuncionamiento del DECT con la RDSI, con redes GSM y con redes de datos.

4.4 ARQUITECTURA DE PROTOCOLOS

Las especificaciones básicas del interfaz común (CI) del DECT pueden encontrarse en los documentos [ETS175]. En ellos se establecen dos clases de datos: de control y de usuario, y una arquitectura de protocolos que tiene cierta correspondencia con la arquitectura de protocolos OSI (*Open Systems Interconnection*).

Los datos de usuario son transportados por el plano U. Es un flujo de datos que fluye entre las unidades de enlace y el terminal portátil. Como sólo se debe controlar un enlace de datos, los únicos protocolos requeridos son los de la capa de control del enlace de datos.

Los datos de control son utilizados exclusivamente para controlar el funcionamiento de la red DECT. Entre sus tareas se encuentra el control de traspasos con la correspondiente conmutación de estaciones base, y el encaminamiento de las llamadas hacia la unidad de enlace para ser entregadas a la red local o pública. Todo ello requiere funciones de direccionamiento y debe incorporar una capa de protocolos a nivel de red.

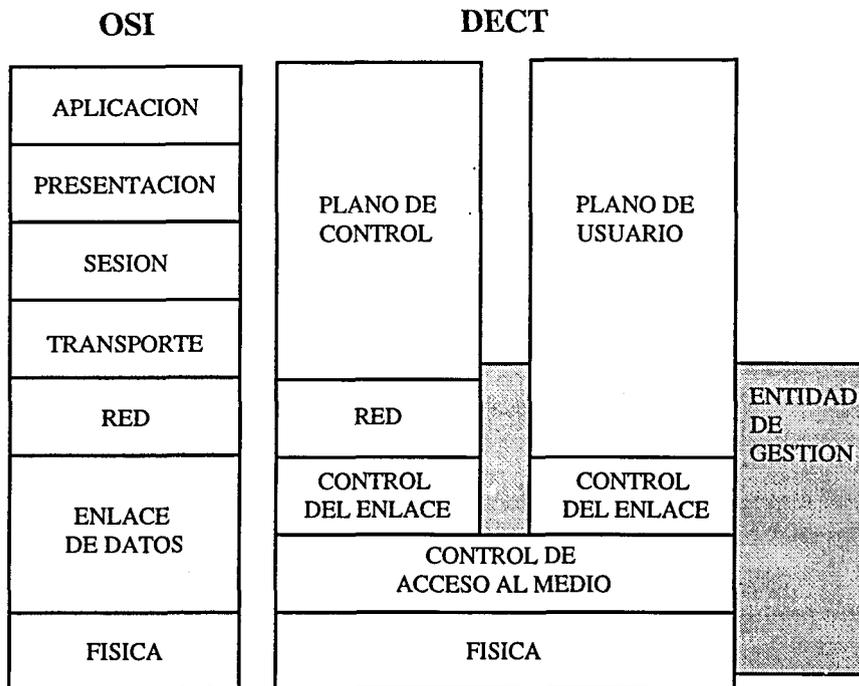


Figura 4.2. Estructura de capas de los protocolos del interfaz radio del DECT.

En la figura anterior podemos ver que la arquitectura de capas de los diferentes protocolos del DECT sigue el modelo marcado por la arquitectura OSI. Observamos que

los datos de usuario y control se tratan de la misma forma en las dos capas inferiores, pero tienen diferente control de enlace.

Finalmente, existe una entidad de gestión que no está involucrada en la comunicación pero controla las cuatro capas de protocolos y toma las decisiones pertinentes. Un ejemplo es la decisión de cuando la calidad del enlace no es suficiente y debe realizarse un traspaso.

4.4.1 CAPA FISICA

La capa física es la responsable de segmentar el espectro radio en canales físicos. Esta división se realiza en dos dimensiones: frecuencia y tiempo. La división utiliza acceso múltiple por división en tiempo (TDMA: *Time Division Multiple Access*) en varias frecuencias (MC: *Multiple Carrier*). Se dispone de 10 portadoras en la banda de frecuencias entre 1880 MHz y 1900 MHz. Las frecuencias centrales siguen la siguiente distribución:

$$f_c = 1897.344 \text{ MHz} - c * 1728 \text{ KHz} \quad \text{con } c = 0, 1, \dots, 9$$

La ETSI prevé una futura expansión de frecuencias si la demanda lo requiere.

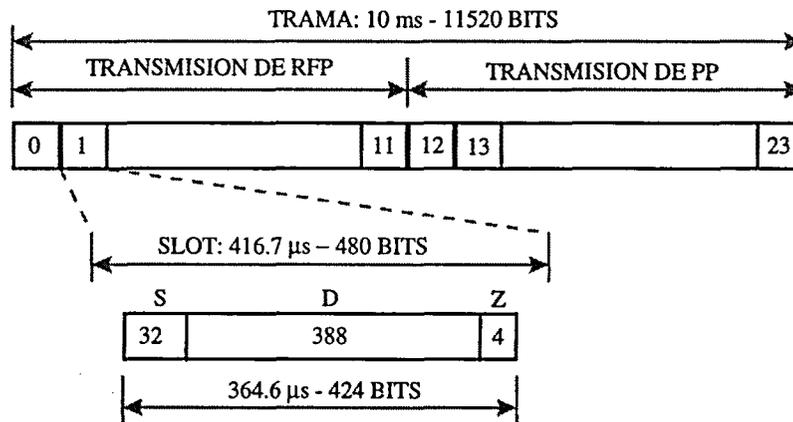


Figura 4.3. Estructura de una trama DECT.

En la dimensión temporal, cada portadora se divide en tramas de 10 ms que contienen 24 slots de aproximadamente 416.7 μs (figura 4.3). Los datos se envían en forma de paquetes de 388 bits en los campos D (Datos) de estos slots. Aparte, observamos que cada slot contiene dos campos adicionales. El campo S (Sincronización) de 32 bits, sirve para sincronizar el receptor y poder demodular los paquetes de forma rápida. El campo Z, obligatorio en algunos casos y opcional en otros, repite los últimos 4 bits del campo D, denominados campo X. Comparando los bits de

los campos X y Z pueden detectarse sistemas desincronizados deslizándose por la parte final del slot. En caso de que la parte afectada por el desincronismo fuera la inicial se detecta monitorizando los errores en la secuencia de sincronismo (S).

El slot de la figura 4.3 se denomina slot básico y se emplea en las comunicaciones de voz, sin embargo para otros servicios pueden utilizarse alternativas con longitudes de campo D que van desde 64 hasta 868 bits. Esta última configuración utiliza canales con dos slots consecutivos y a la misma frecuencia (doble slot). El tiempo de guarda entre estos dos slots (48.6 μ s), normalmente utilizado para que los transceptores puedan cambiar de frecuencia o para compensar retardos de propagación, es empleado en este caso para transmitir datos, consiguiéndose así más del doble de bits de datos que en un slot básico.

La modulación empleada es una GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) con un producto ancho de banda - periodo de bit (BT) igual a 0.5. Esta modulación se escogió porque permite la utilización de receptores simples con modulación no coherente, decisión bit a bit y filtros de frecuencia fácilmente implementables [TUT]. La velocidad de transmisión total en cada portadora es de 1152 Kbps. La potencia de pico máxima transmitida es de 250 mW aunque en determinadas ocasiones se permite el uso de antenas con ganancias de hasta 22 dB. Para enlaces de larga distancia el estándar prevé la utilización de estaciones repetidoras [ETR246].

Los canales físicos se realizan transmitiendo un paquete de datos en un slot y a una frecuencia determinados. La velocidad disponible es de 38.8 Kbps de los cuales 32 Kbps se utilizan para datos de usuario y los restantes 6.8 Kbps para datos de señalización del sistema. El realizar una conexión bidireccional requiere dos slots para transmitir información, uno en cada sentido. Normalmente, durante los 12 primeros slots transmiten las estaciones base y durante los 12 últimos los terminales.

4.4.2 CAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO

La capa MAC (*Medium Access Control*) tiene tres funciones principales. Primero, asignar y liberar recursos del sistema según las directrices de las capas superiores. Segundo, multiplexar los canales de señalización y de usuario en los canales físicos ofrecidos por el nivel físico. Finalmente, garantizar una transmisión segura de los datos mediante control de errores.

4.4.2.1 Asignación y liberación de recursos

En la gestión de recursos intervienen dos factores principales: el mecanismo de asignación de canal dinámico (DCA: *Dynamic Channel Allocation*) y la emisión en todas las estaciones base de un canal piloto o *beacon*.

Asignar los canales dinámicamente significa que cualquier estación base puede utilizar todos los canales de que dispone el sistema siempre y cuando se cumplan unas determinadas condiciones. No existe una planificación previa de frecuencias que asigna diferentes canales a determinadas células como en el caso de la asignación fija de canal (FCA: *Fixed Channel Allocation*). De esta forma el sistema puede adaptarse a posibles fluctuaciones del tráfico o a las condiciones cambiantes de propagación de la señal de radio. Además, para sistemas pico-celulares las asignaciones fijas son complicadas de realizar debido al reducido tamaño y elevado número de células del sistema.

El algoritmo de asignación consiste en que un terminal portátil, cuando se activa, busca la estación base del sistema de la cual recibe más potencia. A continuación se queda a la escucha de sus canales de control esperando recibir una llamada entrante o realizar una de saliente. Al mismo tiempo, el terminal mantiene actualizada una lista con los canales del sistema ordenados en orden creciente de interferencia recibida. Cuando debe establecer una conexión escoge el primer canal de la lista, el menos interferido, y comprueba que supera el umbral de calidad mínimo en el enlace de bajada. Si es así, el terminal propone este canal a la estación base quien comprueba si el canal es apto para la comunicación en el enlace de subida. En caso afirmativo el canal es utilizado para la conexión y en caso contrario, el terminal repetirá el proceso con el segundo canal de la lista. Este mecanismo de acceso puede ser repetido hasta un máximo número de intentos. En caso de que se supere dicho límite sin poder establecer la conexión, la llamada queda bloqueada. Este mecanismo sirve para encontrar un canal que disponga de suficiente calidad en los dos extremos de la conexión, sin embargo, si el problema reside en que la estación base tiene todos sus slots ocupados, el intentar canales diferentes no soluciona el acceso. Para este caso el DECT prevé que el terminal pueda conectarse a una estación base alternativa que no sea la de mayor potencia e intentar el acceso en ésta.

Cuando la calidad de un enlace cae por debajo del umbral mínimo se inicia un proceso de traspaso. Los traspasos son del tipo *seamless* que permiten tener los dos canales, el viejo y el nuevo, activos durante un corto instante de tiempo que es utilizado para conmutar la conexión, garantizando que el usuario no percibe el cambio. El algoritmo para buscar un nuevo canal es el mismo que el utilizado en establecer una nueva conexión.

El segundo aspecto importante en la asignación de canales es el hecho de que cada estación base transmite continuamente un canal piloto de señalización en al menos un canal físico. El terminal utiliza estos canales para saber cual es la estación base mejor, obtener información del sistema y recoger las peticiones de llamadas entrantes. La ventaja que tiene este sistema es que el terminal no debe ir buscando continuamente nuevos canales con lo que el tiempo de establecimiento de comunicación se reduce.

Cabe destacar que los canales piloto son transmitidos por todos los canales activos de la estación base. Se utiliza un grupo de bits del campo de control del slot para transmitir este canal de señalización. En caso de que no exista ningún canal activo en la

estación base se activará uno para poder realizar la transmisión, normalmente el último que ha estado activo.

4.4.2.2 Multiplexación de canales lógicos

En el estándar DECT existen comunicaciones orientadas a conexión y no orientadas a conexión. Las más usuales, utilizadas por los canales de voz son las orientadas a conexión. El sistema emplea en este caso varios canales lógicos para el control y la señalización:

- C_S : Información de señalización de la capa de control del enlace de datos del plano C. Transmisión a baja velocidad.
- C_F : Información de señalización de la capa de control del enlace de datos del plano C. Transmisión a alta velocidad.
- I_N : Datos de usuario sin protección.
- I_P : Datos de usuario protegidos por un código detector de errores tipo CRC (*Cyclic Redundancy Check*) de 16 bits de redundancia de la capa MAC
- G_U : Información de señalización de la capa de control del enlace de datos del plano U.
- Q: Canal de información del sistema. Canal unidireccional, transmitido por las estaciones base para dar información de la parte fija del sistema DECT a los terminales.
- N: Canal para transmitir los identificadores del sistema.
- M: Canal para transmitir información de señalización interna de la capa MAC.
- P: Canal para transmitir información de las llamadas entrantes al sistema DECT.

Para transmitir estos canales el DECT divide el campo D del paquete físico en varias partes, en la figura 4.4 observamos el paquete de voz que es el más usual. Toda la señalización viaja en la parte de control del paquete, también denominada parte A, a excepción del canal C_F que al requerir mayor ancho de banda tiene que apropiarse de parte del de la información de usuario que viaja en la parte B. La multiplexación de los canales de control de la parte A se realiza construyendo una estructura superior, formada por 16 tramas y denominada multitrama. En cada trama de la multitrama se transmiten uno o varios canales de señalización diferentes.

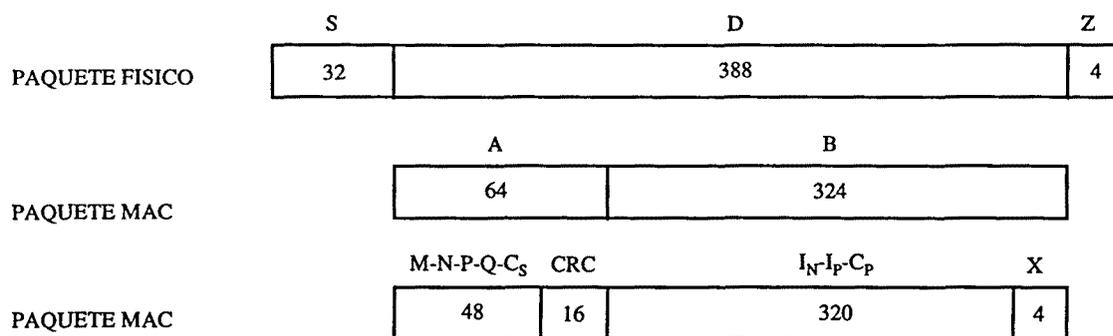


Figura 4.4. Multiplexación de los canales lógicos en los físicos.

El control de las comunicaciones del sistema (establecimiento, mantenimiento y liberación) viaja por el canal C. Este se divide en dos subcanales, el C_S para la señalización que debe transmitirse en paralelo con la información de usuario, y el C_F para cuando se requiere alta velocidad, en este caso debe tomarse ancho de banda de la información. El canal M es muy similar al canal C pero su información es sólo de la capa MAC y no es visible por las capas superiores. Por el canal N se transmiten regularmente los identificadores tanto de las partes fijas como de los terminales portátiles.

Para informar a los terminales de llamadas entrantes al sistema DECT se utiliza el canal P. Este canal solamente requiere de la dirección estación base a terminal. Otro canal de señalización que sólo existe en el enlace de bajada es el canal Q. Este se utiliza para enviar información de identificación y estado del sistema.

4.4.2.3 Control de errores

Todos los canales de señalización que viajan en el campo A del paquete están protegidos de errores por un código tipo CRC con 16 bits de redundancia. Sin embargo solamente se reenvían los datos erróneos de los canales de señalización C_S y C_F, en los demás casos la detección sólo sirve para corroborar la validez de los datos.

En el caso del campo B también se calculan 4 bits de redundancia. Estos 4 bits se sitúan en el campo X y sirven junto con el campo Z, comentado en el punto 4.4.1, para detectar sistemas interferentes desincronizados.

La información de usuario viaja normalmente sin protección, el canal de datos de usuario I_N dispone en este caso de un ancho de banda de 32 Kbps que son utilizados en las comunicaciones telefónicas para transmitir voz codificada ADPCM (*Adaptive Differential Pulse Code Modulation*). Existe la posibilidad de enviar la información de usuario protegida, canal I_p, en este caso se dividen los datos en paquetes de 64 bits y se protegen con 16 bits de redundancia. Cuando una trama llega con error es retransmitida. Para estos canales la velocidad máxima conseguida es de 25.6 Kbps. Si se desean

transmisiones con mayores anchos de banda es posible establecer conexiones con más de un slot en cada sentido.

4.4.3 CAPA DE CONTROL DEL ENLACE DE DATOS

Esta capa es la encargada de aislar el enlace radio de las capas superiores. Su tarea principal es la de proporcionar enlaces libres de errores a la capa de red, aunque muchos ya vengán solucionados por la capa MAC. Una vez el enlace de datos se ha establecido esta capa debe mantenerlo incluso si los recursos físicos deben ser cambiados durante la conversación. Este es el caso de los trasposos, o de una petición de cambio de ancho de banda durante la conversación que requiere asignar nuevos slots o liberar aquellos que son innecesarios.

La arquitectura de protocolos DECT diferencia los datos a transmitir en la capa de control del enlace de datos. Existe una capa de enlace para los datos de señalización y una para los de usuario. La del plano C es común para todos los servicios del DECT y proporciona enlaces muy seguros para la señalización. La capa del plano U permite escoger entre varias alternativas con distintos niveles de protección.

4.4.4 CAPA DE RED

La capa de red es la capa principal del protocolo de señalización y también la de más alto nivel. Sus funciones son proveer los medios para solicitar, reservar, gestionar y abandonar los recursos del sistema central y el terminal portátil. Los recursos son aquellos necesarios para mantener una conexión sin hilos entre el terminal y el sistema central y poder conectar el sistema DECT a la red externa.

El protocolo está estructurado como un grupo de entidades independientes pero conectadas y que realizan funciones diferentes:

- **Control de llamadas:** Tiene las tareas de establecer y liberar las conexiones de la red, negociar las características de las conexiones, controlar las unidades de enlace y transferir los servicios suplementarios.
- **Servicios suplementarios:** Esta parte del protocolo soporta la gestión de servicios avanzados de redes de telecomunicación, como son: llamada en espera, transferencia de llamada, grupo cerrado de usuarios, etc.
- **Gestión de la movilidad:** Tiene cuatro funciones principales: La gestión de identidades de los abonados, la autenticación de los terminales que se conectan, la localización de los terminales en el área de cobertura del sistema

y la transferencia de la información del sistema para que los terminales puedan identificarlo y conectarse.

- Servicio de mensajes: Transferencia de mensajes alfanuméricos a los terminales.
- Control de enlace: Es la entidad encargada de coordinar los enlaces lógicos suministrados por la capa de control de enlace de datos a las necesidades de la capa de red. Un ejemplo es el caso de que durante una conexión se decide cortar el enlace de datos debido a que no hay tráfico a transmitir, más tarde, cuando si lo hay, debe restablecerse. La conexión que se ha suspendido temporalmente es la del nivel de enlace de datos y no la del nivel de red.

4.4.5 ENTIDAD DE GESTION

La entidad de gestión de las capas bajas (LLME: *Lower Layer Management Entity*), contiene procedimientos que afectan a más de una capa. La localización de los principales procedimientos es la siguiente:

- En la capa MAC:
 - Creación, mantenimiento y liberación de servicios portadores, activando y desactivando pares de canales físicos.
 - Gestión de los canales físicos, incluyendo la elección de los mismos y la monitorización de sus calidades.
- En la capa de control del enlace de datos:
 - Gestión de la conexión, que incluye el establecimiento y liberación de las conexiones en respuesta a peticiones de la capa de red.
 - Encaminamiento de los datos de los planos U y C a las conexiones apropiadas.
- En la capa de red:
 - Identificación y negociación de los servicios de comunicación que solicita el usuario.

4.5 CONCLUSIONES

Con este capítulo se pretende dar una visión general de las principales funciones, entidades y parámetros del DECT que serán utilizados en el presente estudio. No pretende ser un análisis en profundidad del estándar sino más bien un texto lo suficientemente amplio para comprender la operatividad del sistema, pero sin entrar en detalles que son irrelevantes para la evaluación de su comportamiento en exteriores y que están suficientemente especificados en los estándares.

Como resumen podríamos decir que el DECT es un estándar de acceso radio a redes de comunicación públicas o privadas. Sus principales ventajas son la gran versatilidad que posee en prácticamente todos los campos. Puede ser utilizado en múltiples entornos: residencial, oficinas, telepunto y bucle de abonado vía radio. Ofrece gran variedad de servicios: telefonía, fax, datos a diferentes velocidades, vídeo, es compatible RDSI y permite nuevos servicios. Proporciona acceso a redes como: telefónicas fijas, RDSI, GSM, X.25, redes de área local, PABX, etc. Tiene un algoritmo dinámico de canal que permite: ser autoadaptativo, la coexistencia de varios operadores sin una división del espectro, alta capacidad y movilidad. La codificación utilizada para la voz (ADPCM) y el ancho de banda de cada canal (32 Kbps) garantizan una alta calidad telefónica y permiten la transmisión de datos de forma transparente. Finalmente, como la carga de procesado de información y la traducción de la misma a los formatos de las redes conectadas recae en la parte fija del sistema DECT, los terminales portátiles tienen baja complejidad y resultan económicos.

Su principal desventaja es su radio de cobertura. Al ser diseñado en un principio para entornos de interiores, se le adjudicó una baja potencia de emisión y los terminales no llevan ecualizadores para combatir la dispersión temporal. Si se desea utilizar el sistema en exteriores y con coberturas mayores debe aumentarse la potencia, la directividad de las antenas o utilizarse repetidores.

5. CARACTERIZACION DEL CANAL RADIO

La capacidad de los sistemas celulares está limitada por los recursos de sus estaciones base y por la interferencia que genera el propio sistema. Una vez las autoridades reguladoras han asignado una banda de frecuencias a un operador, éste debe ingeniárselas para conseguir el mayor reuso posible de sus canales y maximizar el número de usuarios a los que puede dar servicio. Un elemento de gran importancia en el cálculo del factor de reutilización de frecuencias es el modelo de pérdidas de potencia que afecta a las señales, deseada e interferentes, al propagarse. El camino de transmisión de la señal puede variar desde la visión directa hasta estar severamente obstruido por paredes, edificios, árboles, etc. Al contrario de los canales que viajan en cables que son estacionarios, los canales radio son extremadamente aleatorios y no ofrecen análisis fáciles. El modelado del canal radio ha sido históricamente una de las partes más difíciles del diseño de sistemas de comunicaciones móviles por radio, y se realiza normalmente de forma estadística con base a medidas específicas de sistemas y en bandas de frecuencias determinadas.

En este capítulo se describen las características de los canales radio y se recopila información sobre diversos modelos de pérdidas de propagación analíticos y empíricos, en áreas urbanas o suburbanas. Existen gran variedad de modelos dependiendo de la frecuencia de la señal, de la distancia entre transmisor y receptor y de las condiciones de la transmisión. En esta tesis se pretende evaluar sistemas de bucle de abonado vía radio en un área suburbana y una aplicación de terminal sin cordón con movilidad en zona urbana, los dos implementados con el DECT. Este es el motivo por el cual la búsqueda de modelos de pérdidas por propagación se enfoca hacia dichos sistemas.

5.1 PROPAGACIÓN RADIO

Los sistemas de telefonía móvil celular son por lo general arquitecturas punto a multipunto, en los que los terminales de abonado pueden estar situados en cualquier

posición dentro de la zona de cobertura de las estaciones base. En el espacio libre la potencia de la señal disminuye con el cuadrado de la distancia. Pero en la práctica, como los sistemas celulares no están en el espacio libre las pérdidas por propagación son más severas que dicha ley. Las pérdidas por propagación en sistemas móviles se modelan mejor como el inverso de la distancia al cubo o a un exponente mayor, pudiendo llegar hasta 5 ó 6 [CAL]. Algunos modelos aplican el cuadrado hasta una cierta distancia y más allá la tercera o cuarta potencia. Estos exponentes tratan de reflejar el comportamiento del terreno, la atmósfera u otros elementos que puedan influir en la propagación.

5.1.1 MECANISMOS DE PROPAGACION

Las señales radioeléctricas al propagarse por el espacio libre no se ven obstruidas por ningún elemento, sin embargo cuando se propagan por la superficie de la tierra no ocurre lo mismo. En este caso existen objetos que interceptan la señal y provocan otros mecanismos de propagación: la reflexión, difracción y dispersión.

Las reflexiones ocurren cuando la propagación de una onda electromagnética se refleja sobre una superficie que tiene unas dimensiones mucho mayores que la longitud de la onda propagada. Las reflexiones ocurren en la superficie de la tierra y en las paredes de edificios.

La difracción ocurre cuando el camino entre el transmisor y el receptor está obstruido por una superficie de esquinas agudas. Las ondas secundarias resultantes de la obstrucción están presentes en todo el espacio que rodea la superficie incluso detrás del objeto, donde no se tiene visión directa con el transmisor. Tanto la difracción como la reflexión dependen de la geometría del objeto y de la frecuencia, amplitud, fase y polarización de la onda incidente.

La dispersión ocurre cuando el medio por donde viaja la onda electromagnética contiene un número elevado de objetos de dimensiones pequeñas comparadas con la longitud de onda de la señal. La dispersión viene ocasionada generalmente por superficies rugosas u objetos como hojas, señales de tráfico, postes de luz, etc. [RAP].

Estos mecanismos de propagación ofrecen ventajas pero también inconvenientes. La principal ventaja es que la mayoría de sistemas celulares operan en áreas urbanas donde normalmente no se dispone de visión directa entre transmisor y receptor y sin embargo la comunicación es posible. Ello es debido a los tres mecanismos descritos, existen objetos en la trayectoria de la señal que la reflejan, difractan y dispersan haciéndola llegar hasta puntos sin visión directa con el transmisor.

La desventaja es que las ondas radio llegan al receptor del terminal móvil desde varias direcciones y por caminos de diferentes longitudes. Ello comporta que exista un

pequeño retardo entre las diferentes señales que llegan al receptor. El receptor combina estas señales y como las fases de recepción son aleatorias, la señal resultante presenta amplias y rápidas variaciones de nivel a lo largo del recorrido del móvil, con mínimos que pueden decaer más de 40 dB respecto del valor medio [HER]. También puede darse el caso de que el terminal sea estático pero existan objetos móviles a su alrededor que le provoquen diferentes reflexiones y le causen variaciones en el nivel de señal recibido [LEE2].

En definitiva, la característica más importante de la propagación por canales radio es su variabilidad. La pérdida de potencia debida a la propagación varía, en primer lugar, con la distancia entre el transmisor y el receptor. La mayoría de los modelos propuestos predicen una variación según una ley potencial negativa con diversos factores. En segundo lugar, por la interposición de objetos en la trayectoria o cerca de ella, terreno variable, edificios, etc. que provocan los denominados desvanecimientos lentos o por sombras (*shadowing*). Estos desvanecimientos suelen modelarse con una distribución lognormal de media cero y una cierta desviación típica que varía desde 3 dB hasta 12 dB, dependiendo de si existe o no visión directa y del tipo de entorno en que se encuentre el sistema [LEE3], [PAR], [RAP], [ZON], [JAK]. Finalmente, la suma de varias señales procedentes de caminos diferentes resulta en variaciones muy rápidas de la señal provocando los desvanecimientos rápidos (*fast fading*). Los desvanecimientos rápidos se modelan por lo general según una distribución de Rayleigh cuando el terminal no recibe ninguna componente de señal directa, y con una distribución de Rice cuando existe una componente directa con varias de no directas [LEE2], [PAR].

5.2 MODELOS DE PERDIDAS DE PROPAGACION

Se han realizado grandes esfuerzos para desarrollar métodos que permitan predecir con la mayor exactitud posible la pérdida básica de propagación. La literatura técnica disponible es muy numerosa y el ITU-R tiene una comisión de estudio, la CE3, dedicada al tema de la propagación. Asimismo, se han desarrollado acciones europeas COST (*Cooperation in Science and Technology*) monográficas sobre este tema (COST 207 y COST 231).

Para modelar la propagación en escenarios donde el terreno es muy irregular o de tipo urbano se han desarrollado procedimientos empíricos de estimación de la pérdida básica de intensidad de campo. Todos ellos se fundamentan en amplias campañas de mediciones y en una posterior correlación de las medidas con las características generales del medio de propagación.

Los primeros modelos estudiados fueron los utilizados en macrocélulas. Actualmente, los modelos más aplicados son los de Lee, Longley - Rice, Durkin, Hata, extensión del modelo de Hata para PCS estudiado por el COST 231, Ikegami, Walfish -

Bertoni y Okumura. En ellos las distancias entre transmisor y receptor son de varios kilómetros y las antenas de las estaciones base se sitúan por encima de los tejados a varias decenas de metros del suelo [HER2], [PAR].

En el presente estudio, el sistema celular a evaluar es el DECT operando en dos entornos, el de bucle de abonado vía radio y el de terminal sin cordón con movilidad. En ambos escenarios se utilizan microcélulas para obtener una mayor capacidad y porque el DECT es un sistema de acceso vía radio de corto alcance. Los radios de las células serán por lo general inferiores a los 500 metros aunque se puedan conseguir distancias mayores. Para la predicción de la atenuación de propagación en estos entornos no son aplicables los métodos anteriormente citados, ya que tanto las distancias de propagación como las alturas de las antenas de las estaciones base a evaluar son menores. En este caso deberán buscarse nuevos modelos.

5.2.1 MODELOS DE PROPAGACION PARA MICROCÉLULAS

En las células con radios de unos pocos centenares de metros o microcélulas, se han detectado dos tipos de propagación: visión directa (LOS: *Line Of Sight*) y no visión directa (NLOS: *No Line Of Sight*). Para ambas situaciones existen varios modelos estudiados tanto por el COST 231, el ITU-R (*International Telecommunications Union - Radiocommunications Standardization Sector*), como por otros autores que después de realizar mediciones en diferentes entornos obtienen los modelos. A continuación se presentan los que mejor se adaptan a los escenarios de bucle de abonado vía radio y terminal sin cordón con movilidad utilizando como tecnología de acceso el DECT.

- 1- Modelo COST 231 Walfish - Ikegami [ATD], [RAP]: Válido para centros metropolitanos y ciudades medianas. Con estaciones base por encima o debajo de los tejados, aunque en el primer caso funciona correctamente y en el segundo de forma mediocre. Las frecuencias de utilización están situadas en el rango (800, 2000) MHz y las distancias de transmisor a receptor en (20, 5000) metros.
- 2- Modelo RACE 1 (*Research on Advanced Communications for Europe*) con dos pendientes [ATD]: Válido para centros urbanos con distribución de calles en forma cuadrada. Estaciones base por debajo de los tejados, rango de frecuencias (900, 1700) MHz y distancias de transmisor a receptor hasta 1 Km. Este modelo presenta dos factores de pendiente de pérdidas: para LOS y NLOS, y para distancias menores o mayores a una determinada distancia de corte.
- 3- Modelo Sakagami - Kuboi [ATD], [GAR2]: Válido para entornos urbanos. Las estaciones base están en media por encima de los tejados, rango de frecuencias de (400, 2200) MHz y distancias entre transmisor y receptor de (500, 3000) metros. Modelo de una sola pendiente que no distingue entre LOS y NLOS.

- 4- Modelo propuesto en el RACE MONET (*Mobile Network*) para microcélulas con calles, en entornos de bucle de abonado vía radio, a utilizar por el futuro sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) [RAC]. Presenta un modelo de dos pendientes para casos de LOS con un punto de cambio de pendiente en los 300 m. Contempla asimismo el caso de transmisiones con pérdida de visibilidad debida a esquinas.
- 5- Modelo ETSI para bucle de abonado: La ETSI en su documento [ETR139] propone tres modelos de una sola pendiente (LOS, casi LOS y NLOS) para el sistema DECT y otros tres para el sistema CT2. Los propuestos para el DECT son utilizados posteriormente en [ETR310] con ligeras modificaciones.
- 6- Modelo presentado en [BER] y [ZON]: Modelo de pérdidas de propagación en calles. Supone que en cada cruce de calles la señal representa un nuevo foco emisor que propaga las ondas electromagnéticas por la calle perpendicular de la cual procede (principio de Huygens).

Existen además gran variedad de modelos semejantes a los anteriores o simplemente modificaciones de los mismos basadas en medidas empíricas en determinados escenarios. [BÖR], [XIA], [HAR], [KOZ], [BUL], [EVA], [MAJ] y [RIZ] presentan modelos de pérdidas de propagación de dos pendientes basados en medidas realizadas en distintas ciudades.

5.3 CONCLUSIONES

Como conclusión de los puntos anteriores podemos decir que la potencia de señal sufre tres efectos atenuadores: atenuación debida a la distancia de propagación, atenuación debida a objetos interpuestos en la trayectoria de la señal (*shadowing*) y atenuación debida a la recepción de la señal procedente de varios caminos con diferente longitud (*fast fading*).

En entornos con terreno irregular o centros urbanos existe un consenso general en que las atenuaciones debidas a sombras pueden modelarse con una distribución lognormal de media cero y cierta desviación típica. También existe consenso en cuanto a la distribución de las atenuaciones multicamino, distribución Rayleigh si no existe ninguna componente directa de señal, y distribución Rice si existe una componente directa y varias secundarias. Sin embargo, no ocurre lo mismo con las pérdidas debidas a la distancia. Para entornos diferentes al espacio libre existe una gran variedad de modelos, todos ellos extraídos de medidas estadísticas con lo que para el entorno donde fueron tomadas son válidas, pero en otros entornos puede que no se aproximen tanto a la realidad. Son modelos que dependen en gran medida de la disposición de objetos en el área donde se propaga la señal.

En la presente tesis se tomará como modelo de pérdidas de propagación debidas a la distancia en la situación de bucle de abonado vía radio con el sistema DECT el utilizado por la ETSI en sus documentos [ETR139] y [ETR310] (modelo 5):

- Para modelar las pérdidas en condiciones de LOS se aplica:

$$L_{LOS}(d) = 30 + 28 * \log(d)$$

- Para modelar las pérdidas en condiciones de NLOS se aplica:

$$L_{NLOS}(d) = 23 + 35 * \log(d)$$

Para el modelo de terminal sin cordón con movilidad en área urbana con el sistema DECT se utiliza el modelo de pérdidas de propagación que supone que la señal propagada en calles perpendiculares a la que se encuentra la estación base, proviene de un foco emisor situado en el cruce de calles (modelo 6). En las calles se supone que se tiene visión directa por lo que el factor de pérdidas por distancia es 2. Cuando la potencia no tiene visión directa se supone que tiene unas pérdidas adicionales de 25 dB. Con ello el modelo es:

- Para modelar las pérdidas en condiciones de LOS se aplica:

$$L_{LOS}(d) = 55 + 20 \log(d)$$

- Para modelar las pérdidas en condiciones de NLOS se aplica:

$$L_{NLOS}(d) = 55 + 20 \log(d_1) + 25 + 20 \log(d_2)$$

d = distancia entre la estación base y el terminal.

d_1 = distancia entre el transmisor y la esquina donde se pierde visión.

d_2 = distancia entre la esquina donde se pierde visión y el receptor.

6. EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DECT UTILIZADO PARA EXTERIORES

En el capítulo 2 y 3 se han visto los aspectos más importantes de las aplicaciones de bucle de abonado vía radio o *Radio Local Loop* (RLL), de Terminal Sin Cordón con Movilidad o *Cordless Terminal Mobility* (CTM) y las características técnicas que hacían del DECT un estándar apto para dar estos servicios: muy buena calidad de voz, posibilidad de transmisiones de datos con diferentes anchos de banda, compatibilidad con RDSI, no necesidad de planificación frecuencial, gran adaptabilidad a fluctuaciones de tráfico, etc. No obstante, el DECT fue diseñado para funcionar en entornos de interiores donde existen paredes, techos, muebles y otros elementos que ocasionan elevadas pérdidas de propagación a la señal, especialmente de la interferente y le permiten grandes capacidades de tráfico [BON1] en una amplia variedad de escenarios [BERG]. En exteriores, el comportamiento puede ser muy diferente y la elevada capacidad que tiene el sistema en interiores puede verse seriamente mermada.

En el presente capítulo se evaluarán dos entornos donde la utilización del estándar DECT resulta interesante desde un punto de vista técnico y económico: el bucle de abonado vía radio y el CTM. Actualmente existen diversas empresas multinacionales que poseen prototipos y realizan pruebas piloto para evaluar las prestaciones de sus sistemas. Sistemas orientados principalmente hacia los países en vía de desarrollo y a países, como el caso de España, tradicionalmente monopolistas en cuanto a operadores de telefonía y que ahora abren su mercado a nuevos operadores. En los dos casos se requiere un rápido despliegue de infraestructura de acceso de los abonados a la red y al menor coste posible. El DECT cumple ambos requisitos pero es necesario un estudio en profundidad del comportamiento de este sistema y de técnicas que permitan aumentar su capacidad al máximo. Para ello se ha desarrollado un simulador software que permite obtener una gran variedad de parámetros del sistema.

El capítulo se compone de tres partes, la primera versa sobre el diseño y funcionamiento del simulador programado en lenguaje C utilizado para la evaluación del sistema. La segunda parte describe el comportamiento del DECT utilizado como RLL. Se observa que su capacidad está limitada por las interferencias producidas por

otros usuarios utilizando el mismo canal. Para mejorar la capacidad del sistema se estudian técnicas de control de interferencias. Se evalúan casos particulares en los que se puede encontrar el sistema como pueden ser altas concentraciones de tráfico aisladas o coexistencia de dos operadores diferentes que no tengan sus estructuras digitales sincronizadas.

Finalmente, la tercera parte estudia un sistema CTM en un entorno urbano donde los terminales son móviles que se desplazan a lo largo de una red de calles con distribución tipo Manhattan. Este entorno tiene características diferentes al anterior ya que el sistema está más protegido contra las interferencias pero, el hecho de que los terminales giren en las esquinas produce grandes pérdidas de señal que ocasionan interrupciones de llamadas por falta de potencia de los receptores.

6.1 CARACTERIZACIÓN DEL SIMULADOR

Debido a la variabilidad del canal de sistemas de comunicaciones móviles celulares con asignación dinámica de canal la mejor forma de estudiarlos es mediante simulación con ordenador [HER]. El primer paso para la implementación de un simulador es la obtención del modelo del sistema. En la construcción de un modelo se busca una representación válida de la realidad. Para que un modelo científico sea útil es necesario que incluya elementos de dos atributos conflictivos: el realismo y la simplicidad. Por un lado, el modelo debe ser una buena aproximación al sistema real e incorporar sus aspectos más representativos. Por otro lado, el modelo no tiene que ser tan complejo que resulte difícil de comprender y manejar. Tengamos en cuenta que, al tratarse de una representación formal, un modelo constituye necesariamente una abstracción. La consideración de mayor número de detalles y aspectos confiere al modelo un mejor reflejo de la realidad, sin embargo, una consecuencia puede ser el aumento de la dificultad en la obtención de una solución.

Se han distinguido dos fases en el modelado del sistema. En la primera se ha modelado el funcionamiento y características operacionales del estándar DECT independientemente de la aplicación en que se utilice. En la segunda fase se modela el entorno de utilización del sistema, corresponde a las características de la aplicación, RLL o CTM, y del escenario donde será utilizado.

El modelo de funcionamiento del estándar DECT es el mismo para los dos casos en estudio, aunque el modelo del entorno comporta dos técnicas de simulación diferentes. Observando el tipo de sucesos que cada aplicación genera, el RLL es un sistema de sucesos discretos porque su estado sólo varía en ciertos instantes de tiempo: en la aparición de una nueva llamada y en su desaparición, durante dos sucesos cualesquiera el sistema permanece estático. El CTM por el contrario evoluciona de

forma continua a lo largo del tiempo, en este caso los terminales son móviles y cambian continuamente de posición.

A grandes rasgos, existen dos estrategias de simulación distintas (figura 6.1.1): simulación síncrona u orientada a intervalos y simulación asíncrona u orientada a sucesos. Cada una de ellas se adapta a uno de nuestros dos casos en estudio.

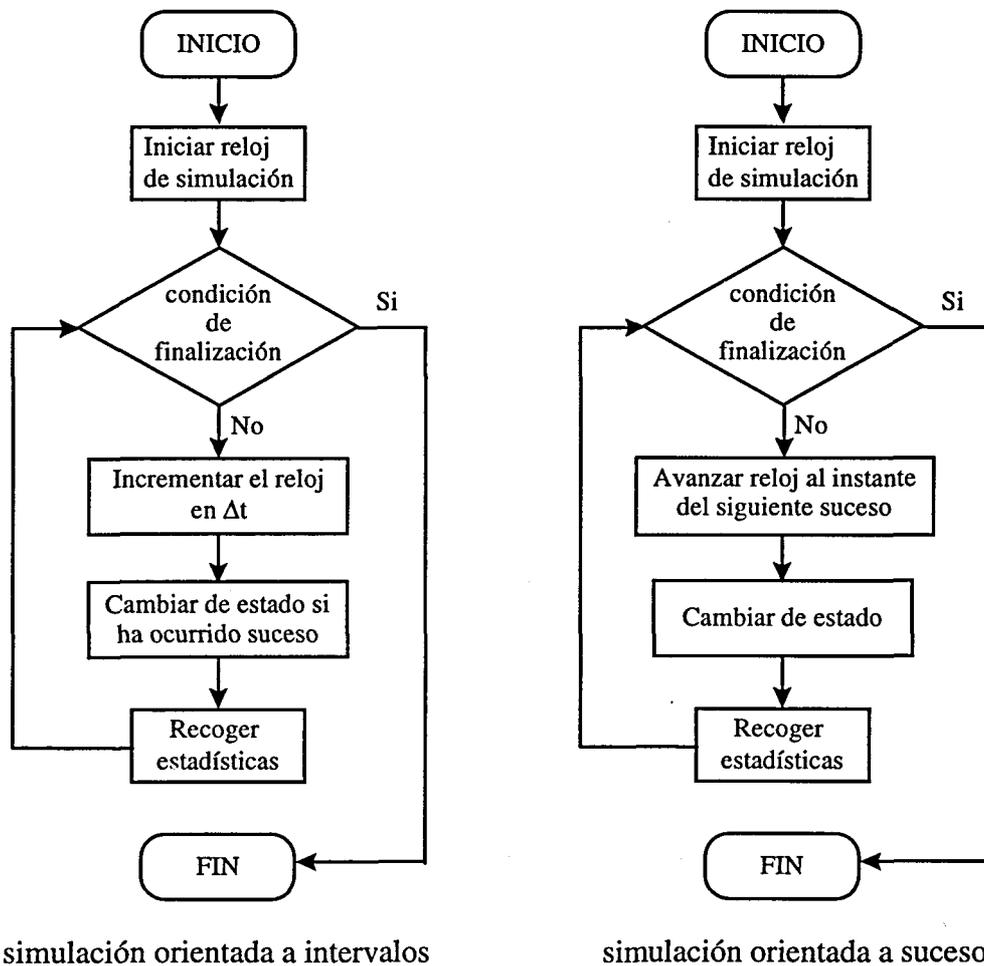


Figura 6.1.1 Mecanismos de reloj de la simulación.

En la simulación orientada a intervalos el tiempo de simulación avanza según pasos fijos de Δt , es decir de t a $t + \Delta t$, a $t + 2\Delta t$, ... El sistema evoluciona, una vez iniciado el reloj, hasta una condición de finalización. Si se da ésta, se imprimen los resultados y termina la simulación. Por el contrario, si no se cumple, el reloj avanza Δt y guarda en memoria las estadísticas. Seguidamente, el sistema cambia de estado si se produce algún suceso y se comprueba de nuevo la condición de finalización. Obviamente, sólo se detectan los sucesos ocurridos en el intervalo de tiempo $(t, t + \Delta t)$ en el instante $t + \Delta t$, con lo que se introducen errores en la simulación. Otro inconveniente del método, es que si los tiempos entre sucesos son muy grandes en

comparación con Δt , invertimos esfuerzo computacional al examinar si se ha producido algún suceso cuando la mayoría de las veces no habrá ocurrido ninguno. La simulación síncrona es un método valioso para sistemas en tiempo continuo pero no para sistemas de sucesos discretos.

En la simulación asíncrona u orientada a sucesos el tiempo de simulación avanza del instante t en que se produce un suceso, al instante t' del siguiente suceso. Así, sólo se representan explícitamente en el modelo los sucesos. Los periodos entre los sucesos son insignificantes, por lo que no consumen tiempo de computación, aunque las actividades entre sucesos consuman tiempo realmente. Para sistemas de sucesos discretos ésta es la estrategia óptima de simulación [RIO].

De los dos métodos de simulación, orientada a eventos o a intervalos, se ha escogido el de intervalos para la aplicación CTM debido a que el movimiento de los terminales es continuo y se debe actualizar cada cierto tiempo. Cada vez que se recalcula la posición de los terminales, se tratan las llamadas que se han iniciado o terminado en el intervalo y se examina la calidad de todos los enlaces, iniciando trasposos en aquellos casos que se requiera. Por el contrario, la aplicación RLL se adapta mejor al método orientado a eventos, ya que entre dos de los sucesos comentados, aparición y desaparición de llamadas, las condiciones del sistema no cambian y resultaría ineficiente ir realizando comprobaciones en otros instantes. En este caso solamente se examina la calidad de las conexiones después de establecerse una nueva llamada o de producirse un trasposo y únicamente en las llamadas que utilicen el mismo canal que el recientemente establecido. No se comprueba la calidad de los enlaces en una desaparición de llamadas ya que este hecho siempre mejora la interferencia del sistema y nunca puede desencadenar trasposos.

El intervalo de tiempo escogido en el modelo CTM no debe ser muy pequeño para evitar perder tiempo de cálculo ni muy grande para evitar errores por pérdida de precisión. El valor que mejor compromiso ofrece es de 50 tramas DECT o de 0.5 segundos. Este valor tiene una buena fiabilidad ya que para llamadas de tiempo medio de 100 segundos, el canal se medirá 200 veces de media. Para los usuarios móviles más rápidos evaluados, de 30 Km/h, 0.5 segundos representa calcular su posición cada 4.1 metros.

El sistema requiere de variables aleatorias no uniformes, caso del tiempo entre aparición de llamadas y duración de las mismas, que se modelan mediante variables aleatorias con función densidad de probabilidad exponencial negativa. Las librerías de programación utilizadas sólo disponen de generación de variables aleatorias uniformes. Para obtener otras distribuciones continuas se utiliza el método de inversión que se basa en la siguiente proposición:

Supongamos que la variable aleatoria X tiene función de distribución F continua, estrictamente creciente y siempre que $0 \leq F(x) \leq 1$. Sea U una variable aleatoria con

distribución uniforme en $[0, 1]$. Entonces, la variable aleatoria $F^{-1}(U)$ tiene función de distribución F .

Para todas las simulaciones se ha tenido en cuenta un periodo transitorio para que el sistema se adapte progresivamente al régimen permanente y durante el cual no se han tomado estadísticas.

6.2 MODELADO DEL ESTÁNDAR DECT

El simulador implementa el mecanismo de funcionamiento del estándar DECT descrito por la documentación de la ETSI [ETS175]. En la figura 6.2.1 se puede observar el diagrama de flujo para una aplicación RLL y en la figura 6.2.2 el de la aplicación CTM.

Los dos tipos de simulación tienen las funciones de establecimiento, finalización y traspaso de llamada en común aunque el mecanismo de reloj de las mismas difiera.

En un sistema real, un terminal se activa, determina cual es la estación base de la cual recibe la máxima potencia y se engancha a ella quedando a la espera de realizar o recibir una llamada. La potencia recibida depende de la distancia entre la estación base y el terminal y de la atenuación debidas a sombras producidas por objetos que se interponen en la trayectoria del enlace. Esta se supone igual para ambos sentidos de la comunicación. Los terminales están monitorizando continuamente los canales de control que emiten las estaciones base, bien sea a través de un canal utilizado por otro usuario que lleva multiplexado información de control, o a través de un canal dedicado, denominado *beacon*, si la estación base no tiene establecida ninguna comunicación. Cuando un terminal desea establecer una llamada, entrante o saliente, escoge el primer canal de la lista que continuamente va actualizando y ordenando según un criterio de mínima interferencia. Seguidamente se comprueba que el canal supera los requerimientos mínimos de relación señal a interferencia, tanto para el canal de bajada como para el de subida. Si este canal no es apto se intenta con el siguiente de la lista repitiendo este proceso hasta un número máximo de intentos. Si se ha encontrado un canal suficientemente bueno se asigna a la llamada y sino ésta se pierde. Además el protocolo DECT también permite que el terminal intente engancharse a otras estaciones base diferentes de la que recibe más potencia. El número máximo de intentos viene limitado por el tiempo de establecimiento de la llamada. Para que este tiempo cumpla los requisitos marcados por la ETSI se ha considerado que el número máximo de intentos es 10.

En el modelo simulado, un terminal aparece en el momento de establecer una llamada siendo irrelevante si anteriormente estaba conectado o desconectado, o si la llamada es entrante o saliente. En ese mismo instante se engancha a la mejor estación

base y busca un canal para la comunicación utilizando el algoritmo anteriormente descrito.

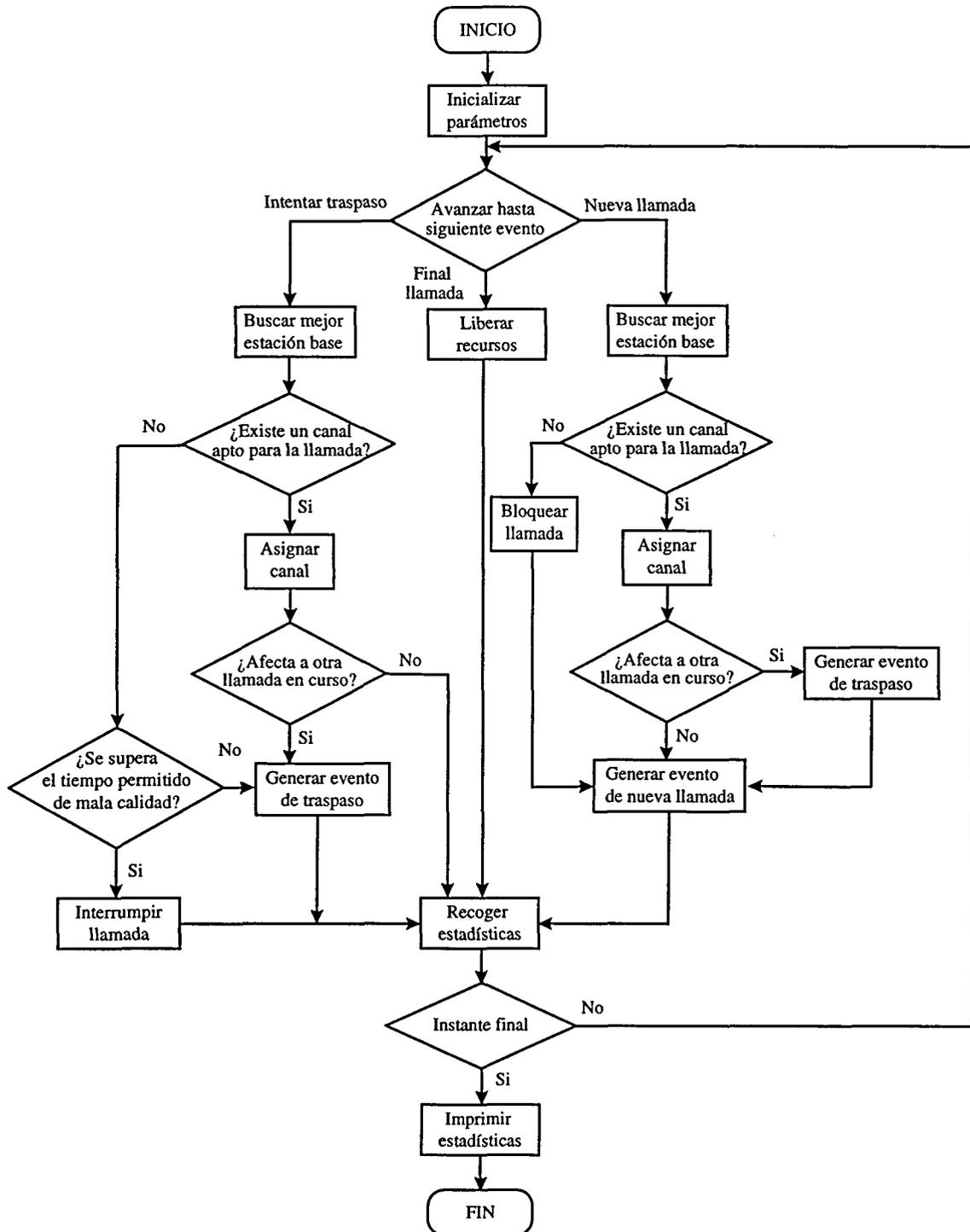


Figura 6.2.1 Algoritmo de funcionamiento del DECT utilizado como RLL.

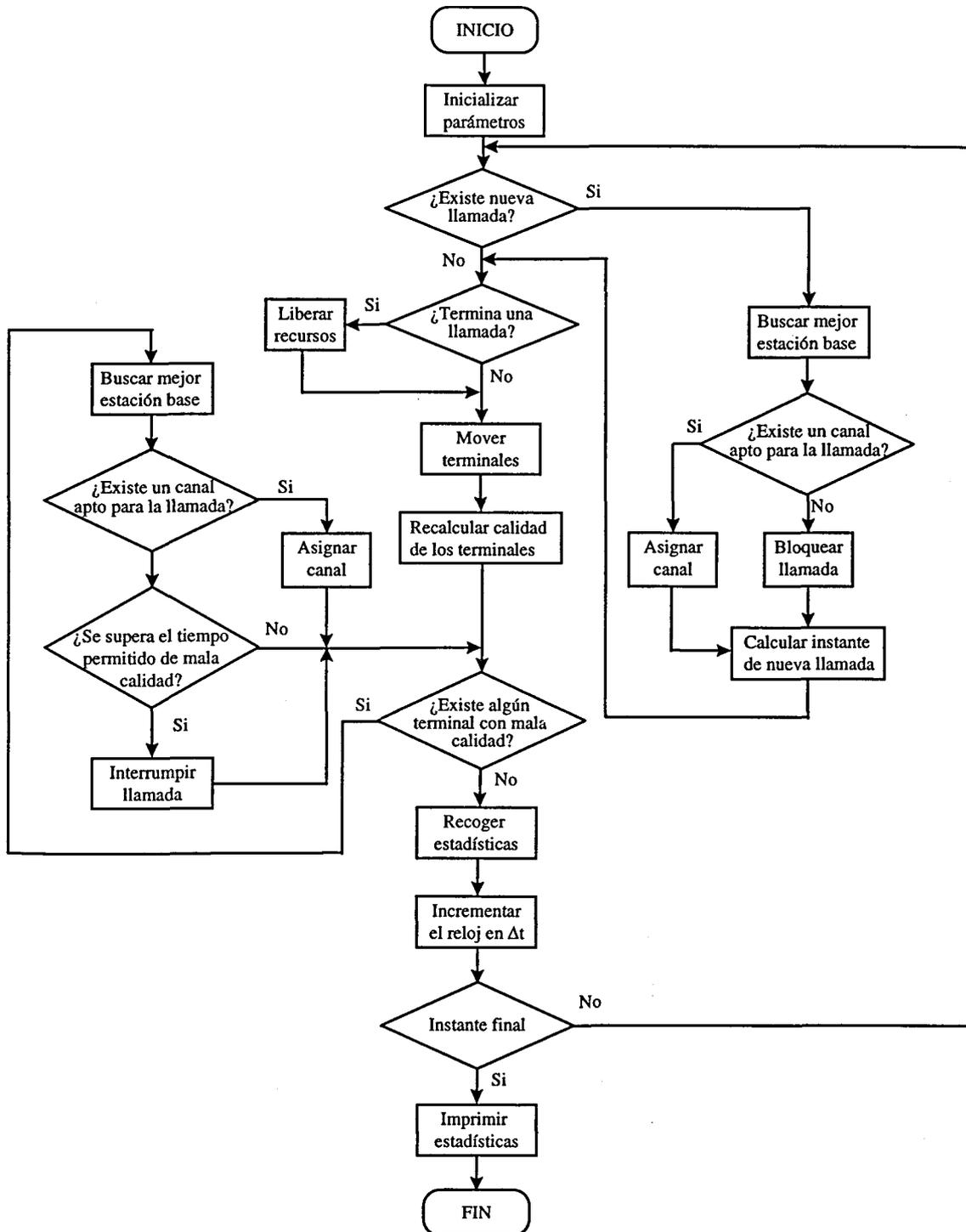


Figura 6.2.2 Algoritmo de funcionamiento del DECT utilizado como CTM.

La fase de finalización se desencadena cuando un terminal ha consumido el tiempo de conversación asignado según una variable aleatoria con la distribución deseada. En la realidad, terminal y sistema realizan el protocolo correspondiente a la

finalización de llamada del protocolo DECT y seguidamente cortan la conversación, quedando el terminal a la espera de nuevas llamadas. En el modelo simulado, el tiempo de liberación de recursos es nulo y el terminal desaparece de la simulación.

En el modelo de RLL, donde los terminales no tienen movilidad, el único suceso que puede ocasionar un traspaso de una llamada ya establecida es la aparición de otra en el mismo canal que la primera. La desaparición de una conexión sólo puede mejorar la calidad de las establecidas y nunca ocasionará ningún traspaso. Por el contrario en el modelo CTM donde los usuarios si tienen movilidad, el desplazamiento del terminal puede ser causa de traspasos e interrupciones de llamadas.

Los sistemas FCA disponen del traspaso intercélula, en el cual el terminal cambia de estación base al no recibir suficiente potencia de la actual. Los sistemas DCA tienen además traspasos intracélula, son aquellos en los que se cambia de canal pero no de estación base. En los sistemas RLL sólo se producirán traspasos intracélula ya que la potencia recibida en los extremos de una conexión siempre será la misma al ser el terminal estático. Los sistemas CTM podrán tener los dos tipos de traspasos ya que los receptores pueden perder la señal cuando los terminales móviles se alejan de la estación base o giran esquinas.

El tratamiento de un traspaso, intercélula o intracélula, es equivalente a la aparición de una nueva llamada. Éste se desencadena cuando la relación señal a interferencia de un enlace es inferior al mínimo requerido o la potencia recibida no supera la sensibilidad de los receptores. En ese instante el terminal busca la estación base de la cual recibe mayor potencia, se engancha a ella, construye la lista de los mejores canales, los ordena según la interferencia recibida en cada uno de ellos, y va intentando el acceso comprobando la calidad de cada enlace hasta un número máximo de intentos. Si se consigue un canal apto se asigna a la llamada y en caso contrario ésta se interrumpe.

Subjetivamente es mucho más molesto una interrupción de llamada durante el transcurso de la misma que un bloqueo en establecimiento. Para reducir el número de llamadas interrumpidas es posible permitir que una conexión que no ha conseguido realizar un traspaso opere bajo el nivel de calidad mínimo durante un cierto tiempo. Durante este tiempo puede que las condiciones de entorno cambien y el traspaso se pueda llevar a cabo. En los dos casos estudiados, RLL y CTM, se ha previsto esta posibilidad.

6.2.1 CRITERIOS DE CALIDAD DEL SISTEMA

El cálculo de la calidad del canal en el sistema DECT se realiza en base a la probabilidad de error de bit (BER: *Bit Error Ratio*), que se mide en las estaciones base y terminales usando un código de redundancia cíclica (CRC). Para poder medir esta

probabilidad de error en el simulador, se debe trabajar a nivel de bit lo cual es muy costoso en tiempo de cálculo. Por este motivo se trabaja sobre la relación señal a interferencia (C/I) necesaria para obtener la BER deseada.

El sistema DECT especifica una BER máxima de 10^{-3} , que utilizando un codificador de voz ADPCM a 32 Kbits/s requiere una C/I mínima de 10 dB en el receptor [AKE], [ETR042].

Existen diferentes métodos para valorar la calidad del servicio ofrecido por la aplicación. Este estudio se basa en la definición de grado de Servicio (GOS: *Grade Of Service*) utilizada por la ETSI en diversos documentos [ETR042], [ETR310] y por otros autores [BON1], [BON2], [AKE].

$$GOS = \frac{\text{Llamadas Bloqueadas} + 10 * \text{Llamadas interrumpidas}}{\text{Llamadas totales generadas}}$$

El GOS utilizado considera que subjetivamente es 10 veces más molesto para el usuario una llamada interrumpida que una bloqueada.

Otros criterios de calidad considerados son:

- Probabilidad de bloqueo: Fracción de llamadas respecto del total generadas que no se pueden establecer.
- Probabilidad de interrupción: Fracción de llamadas respecto del total establecidas que no pueden finalizar normalmente teniéndose que interrumpir al no disponer de suficiente calidad para seguir la comunicación.

Para evaluar el rendimiento del sistema se considera el tráfico soportado por el mismo para un nivel de GOS del 1 %. Este valor es el utilizado normalmente por las compañías operadoras de telefonía para dimensionar sus sistemas y el recomendado por la ETSI [ETR042], [ETR139], [ETR308].

Los sistemas estudiados se ven limitados por dos factores:

- Interferencias: Se produce cuando el número de conexiones establecidas es demasiado elevado para que puedan operar con una C/I satisfactoria. En este caso, para aumentar la capacidad del sistema se requiere la utilización de métodos controladores de interferencias.
- Capacidad: Es debido a que el número de canales disponible en las estaciones base es insuficiente. Nótese que con un único transceptor por estación base, ésta dispone de 12 canales simultáneos y para una probabilidad de bloqueo del 1 %, según la fórmula de Erlang-B, la capacidad por estación base es de 5.8 Erlangs. Si queremos aumentar la capacidad es necesario disponer de más

transceptores en cada estación base. Para 2 transceptores, 24 canales, cada estación base soporta 15.2 Erlangs y para 3 transceptores, 36 canales, 25.5 Erlangs por estación base.

6.2.2 FUENTES DE INTERFERENCIA

La calidad de un enlace se medirá, como se ha comentado, mediante su relación C/I. Para obtener la potencia recibida se emplea la siguiente expresión en unidades logarítmicas:

$$\text{Potencia recibida} = \text{Potencia transmitida} + \text{Ganancia de antenas transmisora y receptora} - \text{Perdidas de propagación} - \text{Factor de sombras con distribución lognormal}$$

La interferencia recibida por un enlace se establece sumando linealmente todas las fuentes de interferencia, las producidas por el propio sistema y las ajenas a él.

- Interferencias del propio sistema:
 - Interferencias co-canal: provenientes de llamadas que utilizan el mismo slot y frecuencia.
 - Interferencias de canales adyacentes: debido a que los filtros receptores o transmisores no son perfectos, es posible tener interferencias de señales trabajando en el mismo slot pero a frecuencias adyacentes.

En las simulaciones realizadas se han tomado filtros con selectividades de -28 dB, -44 dB y -50 dB para las primeras, segundas y terceras frecuencias adyacentes respectivamente (figura 6.2.3) [ETR042].

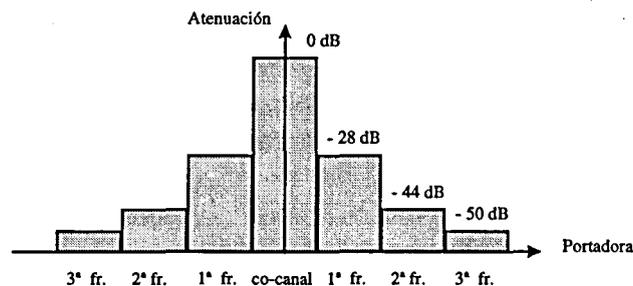


Figura 6.2.3 Selectividad del receptor a frecuencias adyacentes.

- Interferencias ajenas al sistema:

- Ruido: agruparemos en este factor todas las interferencias que no dependen de nuestro sistema y que no podemos prever. Consideramos que es ruido blanco con una potencia calculada según:

$$P_N = K (F - 1) T_0 B$$

donde K es la constante de Boltzman, F la factor de ruido del receptor, T_0 la temperatura de referencia y B el ancho de banda de predetección.

El estándar DECT permite un máximo de 10 portadoras radio, ocupando un espectro de 20 MHz. Cada portadora ofrece 12 slots, resultando un total de 120 canales. Actualmente existen diversos países, España entre ellos, en los que la banda donde se sitúa el DECT es libre para cualquier operador, y que en un futuro próximo puede ser compartida entre diversos operadores o servicios. Podremos encontrar en este caso, dos situaciones diferentes. La primera es que compartan la banda y se interfieran mutuamente, con los consiguientes problemas que puedan derivarse de la falta de sincronismo entre ellos. La segunda, que las 10 portadoras se repartan en varios subgrupos y se asigne uno de ellos a cada operador evitando interacciones entre ellos. En este estudio se contemplan las dos posibilidades. Cuando se divide la banda, se han escogido grupos de 3 frecuencias o 36 canales por operador.

6.3 MODELADO DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN

En el punto anterior se ha descrito el modelo utilizado para simular el estándar DECT. En este apartado se modela el entorno de aplicación, los parámetros del sistema y los aspectos críticos que pueden influir en los resultados finales.

6.3.1 ÁREA DE SIMULACIÓN Y NOMENCLATURA UTILIZADA

El área de simulación se encuentra dividida en varias regiones dependiendo de la cobertura de los diagramas de radiación de las antenas y de los puntos donde estén ubicadas las estaciones base. De esta forma, a la región cubierta por un grupo estaciones base situadas en el mismo emplazamiento se la denomina región de Emplazamiento de Estaciones Base, que en notación ETSI [ETR310] se designa como *DAS: DECT Access Site* o *Cell Site*. Cada emplazamiento de estaciones base podrá disponer de una o varias estaciones base que dividirán la célula en varios sectores. Se utiliza el termino Estación Base para definir la área cubierta por un diagrama de radiación de una antena, en notación ETSI se denomina RFP: *Radio Fixed Part*. Una estación base estándar dispone de un solo transceptor que le permite recibir durante 12 slots y emitir durante otros 12, soportando 12 conversaciones simultáneas. Para entornos con alta densidad de tráfico es

posible disponer de estaciones base con n transceptores que permitan $12 * n$ conversaciones simultáneas.

Se han escogido dos áreas de simulación diferentes según la aplicación a estudiar. Para modelar el bucle de abonado vía radio en un entorno suburbano-residencial se ha escogido un área de simulación rectangular donde se han dispuesto Emplazamientos de Célula distribuidos según una malla hexagonal. Los terminales, que representan usuarios fijos llamando desde su casa, pueden aparecer en cualquier punto de la superficie.

En la aplicación CTM el área de simulación es un cuadrado al que se le superpone una máscara de manzanas de casas y calles estilo Manhattan. En este caso los terminales serán móviles apareciendo y desplazándose a lo largo de las calles. Las estaciones base se dispondrán en las calles o en las esquinas.

En este último caso, la región de un cubierta por un emplazamiento de estaciones base no es hexagonal, como en la aplicación de RLL, sino que pasa a ser la área cubierta por todas las estaciones base situadas en el mismo emplazamiento pudiendo tener múltiples formas.

6.3.2 PARÁMETROS DEL SISTEMA

Existe una gran variedad de parámetros del sistema, unos vienen fijados por el propio estándar DECT, otros dependen del entorno de simulación, algunos deben basarse en valores experimentales y finalmente están los que dependen exclusivamente del simulador.

Para realizar las simulaciones se han utilizado los siguientes parámetros, excepto en aquellos casos en que se especifica lo contrario.

Parámetros fijos del estándar DECT:

- Potencia emitida por el terminal y la estación base: según el estándar DECT [ETS175] la potencia de pico máxima emitida es de 250 mW.
- Duración de una trama: 10 ms.
- Número de slots dúplex por trama: 12.

Parámetros que dependen del escenario bajo estudio:

- Diagramas de radiación de antenas: Se han utilizado varias antenas con diagramas de radiación omnidireccionales y directivos de 180°, 120° y de 60° y diversas ganancias.

- Superficie de simulación del sistema RLL: 100 células distribuidas hexagonalmente (10 x 10), separadas entre sí una distancia de 600 m y que ocupan una superficie de 4674 m x 5700 m.
- Superficie de simulación del sistema CTM: 100 manzanas cuadradas (10 x 10). Anchura de edificios de 100 metros y de calles de 10 metros. Superficie total igual a 1090 x 1090 m.
- Número de estaciones base a las que un terminal puede conectarse en un intento de establecimiento o traspaso: 1.
- Número de canales a los que un terminal puede intentar acceder en un intento de establecimiento o traspaso: 10.
- Tiempo permitido a un enlace con una relación C/I por debajo del umbral mínimo antes de interrumpir la llamada cuando intenta un traspaso y no lo consigue: 5 s. En [ETR042] se utilizan 10 s, pero en este caso se ha creído conveniente rebajar el tiempo de mala calidad.
- Potencia de ruido en los receptores: -100 dBm.
- Selectividad del receptor a las interferencias adyacentes: -28 dB, -44 dB y -50 dB para las primeras, segundas y terceras respectivamente.
- Sensibilidad de los receptores: -83 dBm.
- Ganancia total de antena en el sistema RLL (ganancia estación base + ganancia terminal): 16 dB [ETR139].
- Ganancia de antena de estación base en el sistema CTM: 25 dB.
- Ganancia de antena del terminal en el sistema CTM 0 dB.
- Función de densidad de probabilidad del tiempo entre dos llegadas de llamada: exponencial negativa.
- Función de densidad de probabilidad de la duración de llamada: exponencial negativa de media 100 s. [AKE]
- Función de densidad de probabilidad de la aparición de terminales: uniforme en toda la superficie para el sistema RLL y uniforme a lo largo de todas las calles en el sistema CTM.
- Slots ciegos: Existen dos conceptos de slots ciegos, uno basado en el funcionamiento del DECT y otro en las prestaciones de los equipos. El primero sucede cuando el slot del canal escogido por el terminal ya está en

uso en la estación base por otra llamada y en otra frecuencia. Atendiendo a este hecho cabe resaltar que cada conexión en curso en una estación base le ciega 12 canales. Si el terminal no dispone de información sobre los slots que está utilizando la estación base es posible que intente escoger estos canales decrementando innecesariamente su número de intentos. El segundo tipo de slots ciegos vienen producidos por el hecho de que los equipos emisores / receptores puede que no sean lo suficientemente rápidos para conmutar de frecuencia durante el tiempo de guarda entre dos slots. En este caso una conversación en curso cegará el slot utilizado y los dos adyacentes, es decir 36 canales [BOU].

En las simulaciones realizadas se supone que el terminal tiene información sobre el primer tipo de slots y no intentará acceder a uno que ya esté ocupado. Esta información puede ser obtenida a través de medidas de potencia interferente en los diferentes slots o bien porque la estación base la transmite [MCC][ETS765]. Además todos los equipos son suficientemente rápidos para conmutar de frecuencia en el tiempo de guarda entre dos slots.

Parámetros que dependen de un modelo experimental:

- Modelo de propagación para el sistema RLL:

$$L(d) = 23 + 35 * \log(d) + S$$

S = Atenuación por sombras con función densidad de probabilidad lognormal con media 0 dB y desviación típica de $\sigma = 8$ dB

- Modelo de propagación para el sistema CTM:

Se ha utilizado un modelo de una sola pendiente con unas pérdidas constantes cuando la señal gira una esquina.

$$L_{LOS}(d) = 55 + 20 \log(d) + S \quad (\text{visión directa})$$

$$L_{NLOS}(d) = 55 + 20 \log(d_1) + 25 + 20 \log(d_2) + S \quad (\text{no visión directa})$$

S = Atenuación por sombras con función densidad de probabilidad lognormal con media 0 dB y desviación típica de $\sigma = 8$ dB

donde:

d = distancia entre la estación base y el terminal.

d₁ = distancia entre la estación base y la esquina donde se pierde visión.

d₂ = distancia entre la esquina donde se pierde visión y el terminal.

- Desvanecimientos multicamino para el sistema RLL: margen adicional fijo de 4 dB. Relación C/I mínima requerida igual a 14 dB.

- Desvanecimientos multicamino para el sistema CTM: margen adicional fijo de 11 dB. Relación C/I mínima requerida igual a 21 dB.

Parámetros que dependen del simulador:

- Duración del periodo transitorio: 10 % de la duración total.
- Efecto de contornos: debe considerarse que las llamadas cursadas en la frontera del área de simulación recibirán menos interferencias. Para evitar este efecto no se consideran en las estadísticas las llamadas que aparecen en las dos coronas exteriores de células hexagonales en la aplicación RLL o de manzanas en la CTM.

Los parámetros: modelo de propagación, atenuación por sombras y desvanecimientos multicamino son estudiados con más detalle en cada sistema evaluado ya que su elección influye significativamente en el resultado final.

6.4 EVALUACION DEL MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACION DEL BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

El DECT fue desarrollado para dar un servicio de alta calidad y capacidad, bajo retardo con amplias posibilidades en la transmisión de voz y datos siendo al mismo tiempo económico. Para ello requiere células de pequeño tamaño y velocidades de terminal bajas. Es un sistema orientado básicamente para utilización en interiores.

Debido a sus prestaciones y sencillez se ha situado como uno de los principales candidatos para implementar un sistema RLL. No obstante, debido a que el entorno de utilización varía completamente no es evidente que tenga las mismas prestaciones que en los mencionados entornos de interiores.

La causa principal de las diferencias de comportamiento radica en el modelo de propagación. En entornos de interiores la propia estructura del edificio (techos, paredes y muebles) produce una gran atenuación a la señal permitiendo la existencia de pico-células con una gran reutilización de canales. En exteriores tendremos visión directa en la mayoría de casos con lo que las interferencias son mucho más perjudiciales.

Uno de los objetivos de este estudio es evaluar el DECT utilizado como RLL en entornos suburbanos-residenciales y como mejorar su capacidad. Para ello deben tenerse en cuenta que algunos parámetros son más críticos que otros en el sentido de que pueden modificar el resultado final.

6.4.1 PARÁMETROS CRÍTICOS

Para poder evaluar la capacidad del sistema en el escenario modelado anteriormente deben fijarse algunos parámetros críticos. De estos dependen en gran medida los resultados obtenidos. Los parámetros que comportan más controversia son los relacionados con el modelo de propagación.

Un canal radio en aplicaciones móviles está caracterizado usualmente por la superposición de tres componentes independientes, multiplicativos y con efectos de propagación a pequeña, mediana y gran escala. Las variaciones a pequeña escala, comúnmente denominados pérdidas multicamino, varían de forma muy rápida en el espacio, con cambios significantes en distancias del orden de una longitud de onda. Las variaciones a media escala, referidos como pérdidas por sombras o *shadowing*, representan pérdidas diferentes para distancias de decenas de longitudes de onda y crea variaciones aleatorias en la potencia media de la señal recibida que sigue típicamente una distribución lognormal. En los efectos a gran escala o pérdidas de propagación encontramos los movimientos en distancias del orden de decenas o centenas de metros. Éstos representan una variación de la potencia media de señal según una ley potencial con respecto a la distancia de separación entre transmisor y receptor.

6.4.1.1 Pérdidas de propagación

De los diferentes modelos propuestos en el capítulo 5 se han evaluado dos que son utilizados por la ETSI en varios de sus documentos [ETR139], [ETR310] y por otros autores [RON], uno para modelar entornos con visión directa (LOS: *Line Of Sight*) y otro para no visión directa (NLOS: *No Line Of Sight*).

Para modelar las pérdidas en condiciones de NLOS se aplica:

$$L(d) = 23 + 35 * \log(d); \text{ atenuación por sombras lognormal con } \sigma = 8 \text{ dB}$$

Para modelar las pérdidas en condiciones de LOS se aplica:

$$L(d) = 30 + 28 * \log(d); \text{ atenuación por sombras lognormal con } \sigma = 3 \text{ dB}$$

En la figura 6.4.1 se observa el resultado obtenido para un escenario de RLL con antenas omnidireccionales en estaciones base y terminales y utilizando 3 portadoras de las 10 que dispone el estándar DECT. El hecho de utilizar solamente una parte del espectro ocasiona que el sistema tenga una baja capacidad, circunstancia que será comentada en puntos posteriores.

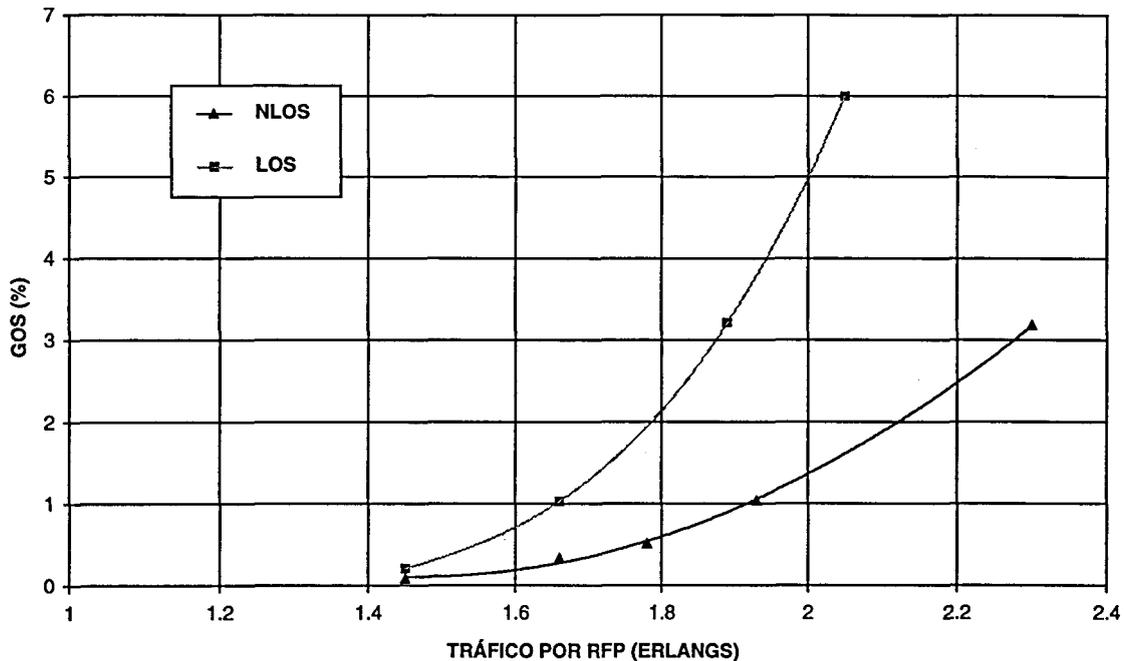


Figura 6.4.1 Capacidad del sistema respecto al modelo de propagación.

El escenario usual de un sistema RLL es aquel que posee una densidad media -baja de usuarios, donde una instalación de cableado no resulta rentable por tener que realizar una gran infraestructura para pocos abonados. Casos típicos son urbanizaciones o barrios residenciales con viviendas unifamiliares aisladas o apareadas y áreas de países subdesarrollados donde el número de teléfonos por habitante es bajo. Las estaciones base y las antenas de los terminales son instaladas en postes o sobre los tejados de las casas a alturas de 6 a 10 metros [ETR139]. En estas circunstancias podemos tomar como caso de referencia para nuestro estudio una separación entre estaciones base de 600 m.

En un entorno de RLL, podemos suponer que la propagación de la señal entre transmisor y receptor tiene visión directa en la mayoría de ocasiones. Aunque en estos casos la señal encuentra usualmente obstáculos en la primera zona de Fresnel debido a que las antenas no están muy por encima de los tejados de las casas. En consecuencia, en las pérdidas de propagación no se toma el modelo de visión directa puro, con exponente de pérdidas igual a 2, sino igual a 2.8. El caso de no visión directa, tampoco debe ser tan restrictivo como en un entorno urbano ya que las condiciones de propagación no son tan restrictivas: existen menos reflexiones y las construcciones son de menor tamaño, produciendo menos sombras. El modelo no considera los cambios de dirección de la señal, introduciendo un escalón de pérdidas fijo o cambiando la pendiente del modelo como suele ocurrir en entornos urbanos, ya que el ángulo entre la esquina donde se produce la pérdida de visión directa y el receptor o transmisor suele

ser menor. El efecto de no visión directa se considera incrementado el exponente de pérdidas.

En la figura 6.4.1 se representan los resultados obtenidos al aplicar los dos modelos de propagación en dos simulaciones distintas. El modelo de propagación escogido se ha aplicado tanto para la señal deseada como para las interferencias. Se observa como el modelo de NLOS obtiene mejores resultados, 1.92 Erlangs por RFP frente a 1.65. Este hecho es debido a que el sistema se encuentra limitado por interferencias y un modelo de propagación con un exponente elevado atenúa más a las señales lejanas (interferencias) que a las cercanas (señal deseada). Como contrapartida en el modelo de NLOS encontramos un mayor número de llamadas que no pueden cursarse debido a la falta de potencia en el receptor, aunque si se dispone de la ganancia de antena suficiente, éstas son mínimas y no afectan el resultado.

Para realizar posteriores evaluaciones se ha escogido el modelo de NLOS al considerar que las interferencias se encuentran mayoritariamente fuera de visión directa, a pesar de que la señal deseada pueda encontrarse en visión directa. Tomando la señal deseada siempre en NLOS se actúa de forma conservadora y se obtiene un cota inferior de la capacidad del sistema.

6.4.1.2 Atenuación por sombras

La potencia de señal instantánea recibida por el terminal se ve afectada por un factor de atenuación debido a sombras. Esta atenuación suplementaria puede modelarse como una variable aleatoria con función densidad de probabilidad lognormal, de media cero y desviación típica σ que depende en gran medida del tipo de entorno utilizado y de si existe o no visión directa. El valor de σ ha sido acotado experimentalmente para entornos de no visión directa entre 4 y 12 dB [ZON], [JAK]. En los estudios realizados sobre RLL por la ETSI se utiliza $\sigma = 8$ dB [ETR310], por lo que en los resultados presentados a continuación también se tomará este valor. En modelos de propagación de visión directa este valor es generalmente menor, en nuestro caso se ha considerado de 3 dB. Se considera, además, que el canal se comporta de forma simétrica para el enlace de subida y de bajada.

Es evidente que el factor de atenuación por sombras no puede otorgar valores muy elevados ya que el modelo no se ajustaría a la realidad. En el presente estudio la función lognormal no tiene infinitos valores sino que se trunca a 3σ [BER], [ZON].

El modelado del factor de sombras puede realizarse de diversas formas según que criterios se tengan en consideración. Un primer criterio es suponer que cuando aparece una llamada, ésta sufre unas pérdidas aleatorias por sombras y se aplica este factor en todos los enlaces, hacia todos los emplazamientos de estación base, deseado e interferentes, y en los dos sentidos de la comunicación. Esta asignación no contempla, en el terminal, la dirección de procedencia de la señal considerándolas todas por igual.

En la realidad no es usual que esto suceda obteniéndose diferentes atenuaciones según la dirección de donde provenga la señal. La distribución de los objetos que provocan las sombras no es idéntica en todas las direcciones. Por el contrario, sí que se tiene en cuenta la dirección de procedencia de la señal en los emplazamientos de estación base. Este hecho se produce al asignar la atenuación en el terminal y considerar los enlaces de subida y bajada simétricos, una estación base ve diferentes terminales y por lo tanto diferentes factores de sombras.

El segundo criterio es suponer que cada terminal ve cada emplazamiento de estación base con un factor de sombras diferente. En este caso, no se tiene en consideración que dos emplazamientos de estación base que se encuentren en la misma dirección puedan tener atenuaciones correladas. El caso real se encontraría entre los dos criterios.

La figura 6.4.2 representa los resultados obtenidos en un escenario de RLL con antenas omnidireccionales en estaciones base y terminales y utilizando 3 portadoras de las 10 que dispone el estándar DECT, con y sin atenuación por sombras. Podemos observar como la aplicación de un modelo de pérdidas debidas a sombras empobrece los resultados. Sea cual sea el criterio escogido, el sistema sin sombras soporta mucho más tráfico. La causa es que al sumar una variable aleatoria, positiva o negativa, a la potencia de señal, ésta aumenta su dispersión que comporta a su vez un aumento de la varianza de la relación C/I de las conexiones. Este aumento de varianza, aunque la media no varíe, tiene como resultado un mayor número de llamadas que no superan la calidad mínima requerida.

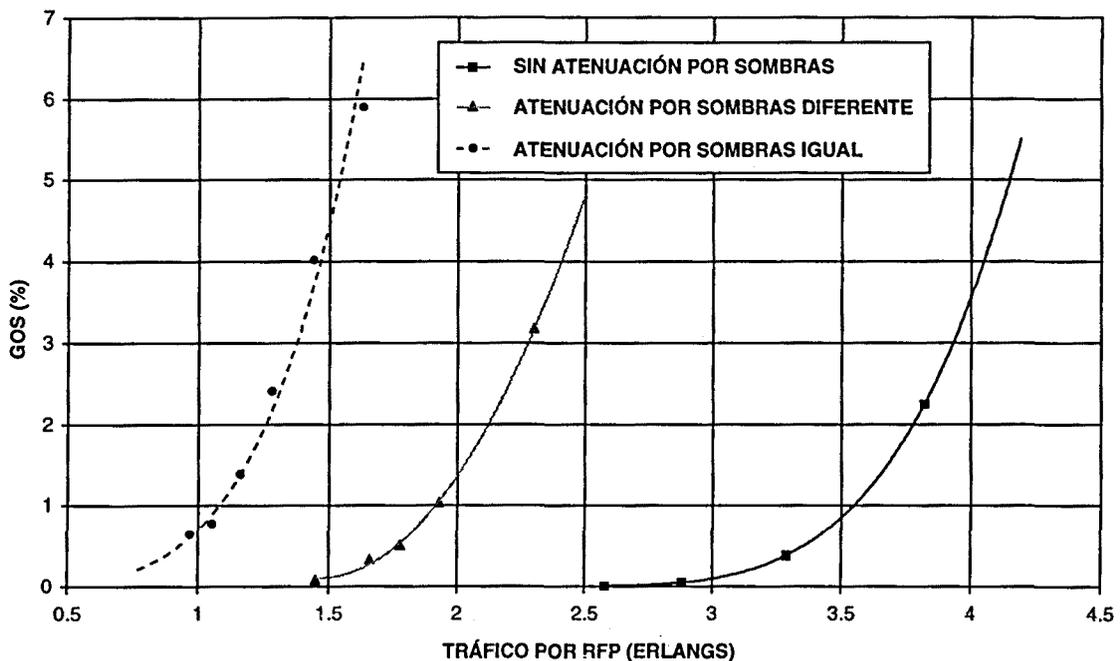


Figura 6.4.2 Efecto de las atenuaciones por sombras.

Si aplicamos el criterio de que los terminales tienen igual factor de atenuación por sombras para todas las direcciones, se obtienen 1.1 Erlangs por RFP mientras que si es diferente se pueden cursar 1.9. La causa de este resultado es que en el primer caso, cuando se asigna un factor de sombras muy atenuante a un terminal, éste tendrá una baja relación C/I con lo que no podrá cursar la llamada correctamente. Con el segundo criterio, cuando se aplica diferente factor para cada emplazamiento de estación base, si se asigna una fuerte atenuación a la estación base más cercana al terminal, es poco probable que también se asignen otros factores de este orden a las otras estaciones base cercanas. Incluso es probable que alguna de ellas tenga un factor de atenuación negativo mejorando su potencia. De este modo el terminal tiene la posibilidad de conectarse a una estación base, que no siendo la más cercana, sí que tiene un factor de sombras favorable resultando en una calidad final superior.

En el presente estudio se ha considerado que el criterio de diferentes factores de atenuación por sombras para diferentes direcciones está más cercano a la realidad, por lo que se ha utilizado éste.

6.4.1.3 desvanecimientos multicamino

En comunicaciones vía radio, al receptor le llegan diversas versiones de la señal original que, por llegar a través de caminos diferentes, han sido desfasadas en el tiempo y atenuadas en diferente grado. En consecuencia la señal recibida es la suma, constructiva o destructiva, de todas estas reproducciones procedentes de reflexiones y refracciones de la señal original. El resultado es la recepción de una potencia instantánea fluctuante respecto a pequeñas variaciones en la posición del terminal y que sigue una distribución de Rice si existe una componente dominante o de Rayleigh en caso contrario.

Atendiendo al tiempo de procesado y la potencia de cálculo necesarios para generar los desvanecimientos multicamino, se ha escogido el criterio de dejar un margen de protección a la relación C/I mínima en lugar de calcular una variable aleatoria con aquellas distribuciones. De esta forma, si para conseguir una BER de 10^{-3} el decodificador ADPCM requiere una C/I mínima de 10 dB, consideraremos que para establecer y mantener una llamada se necesitan estos 10 dB más aquellos del margen de protección por desvanecimientos multicamino. Un margen común en aplicaciones móviles es de 20 dB, en caso de disponer de diversidad de antena se puede rebajar 10 dB [ETR042] y considerando que en un gran número de ocasiones se dispondrá de visión directa se toma un margen de 4 dB. La C/I mínima final queda establecida en 14 dB [AKE].

En la figura 6.4.3 se presentan los resultados para un escenario de bucle de abonado vía radio, con antenas omnidireccionales en estaciones base y terminales, utilizando 3 portadoras de las 10 que dispone el estándar DECT y diferentes márgenes de protección contra atenuaciones debidas al efecto multicamino. Considerando el

margen antes mencionado de 4 dB se llegan a cursar 1.9 Erlangs por RFP, por el contrario si se disminuye la protección a tan solo 1 dB se incrementa la capacidad en un 25 % llegando a 2.5 Erlangs por estación base.

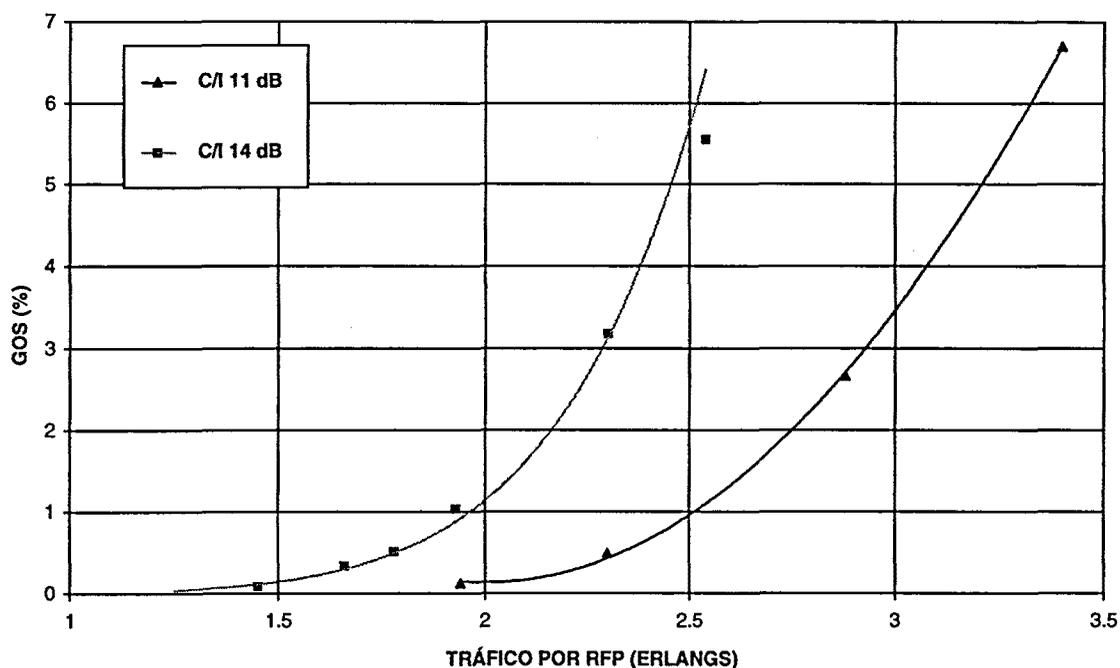


Figura 6.4.3 Capacidad del sistema respecto a la relación C/I mínima requerida en los receptores.

Si bien se consigue un incremento de capacidad con protecciones menores, se considera que debe dejarse un margen suficientemente amplio para poder combatir la atenuación multicamino. Con lo cual escoger 1 dB no se cree realista. Todos los resultados de RLL presentados en el presente estudio toman como margen de protección contra desvanecimientos multicamino 4 dB.

6.4.1.4 Efecto de la sensibilidad y la ganancia de antenas

Todo receptor requiere de un mínimo de señal recibida para poder funcionar correctamente. A pesar de que la relación C/I sea excelente si la potencia recibida es inferior a la sensibilidad de los receptores, la llamada no puede ser cursada. Dado que se está estudiando un escenario donde los terminales son fijos, la sensibilidad sólo afecta en el establecimiento y no puede ser la causa de ninguna llamada interrumpida. En sistemas con terminales móviles, estos pueden alejarse lo suficiente de la estación base durante la llamada y sí que pueden darse interrupciones por falta de potencia. La pérdida de llamadas debido a la sensibilidad de los receptores puede combatirse disminuyendo el tamaño de las células y aumentando la potencia transmitida o la ganancia de las antenas. La potencia de emisión del DECT no puede superar los 250 mW ya que fue

diseñado para interiores Si se pretende utilizar en exteriores, con células de tamaño razonable (de radios superiores a los 100 m) es necesario disponer de antenas directivas que concentren la potencia en la dirección deseada. En el caso de antenas omnidireccionales en el plano horizontal la ganancia se consigue comprimiendo el diagrama de radiación en el plano vertical.

Cuando la separación entre estaciones base viene fijada por motivos de poca densidad de usuarios o de presupuesto y no pueden instalarse células de pequeño tamaño, el único parámetro disponible para compensar la sensibilidad es la ganancia de antena. Actuar sobre la ganancia de antena tiene la ventaja que no afecta a la relación C/I, ya que su efecto multiplicativo afecta tanto al numerador como al denominador de la relación.

La figura 6.4.4 presenta un escenario de RLL con emplazamientos de estaciones base formados por 3 sectores de 120° con una estación base o RFP en cada uno de ellos. Todas las antenas de estación base o terminal tienen un diagrama de radiación de 120° y se utilizan 3 frecuencias.

En la mencionada figura se representa el grado de servicio del sistema respecto a la ganancia total de antenas (emisora + receptora) teniendo en cuenta aquellas llamadas perdidas por falta de potencia. El mismo sistema, en iguales condiciones de tráfico cursado, pero sin considerar pérdidas por sensibilidad ofrece un GOS del 0.33 %.

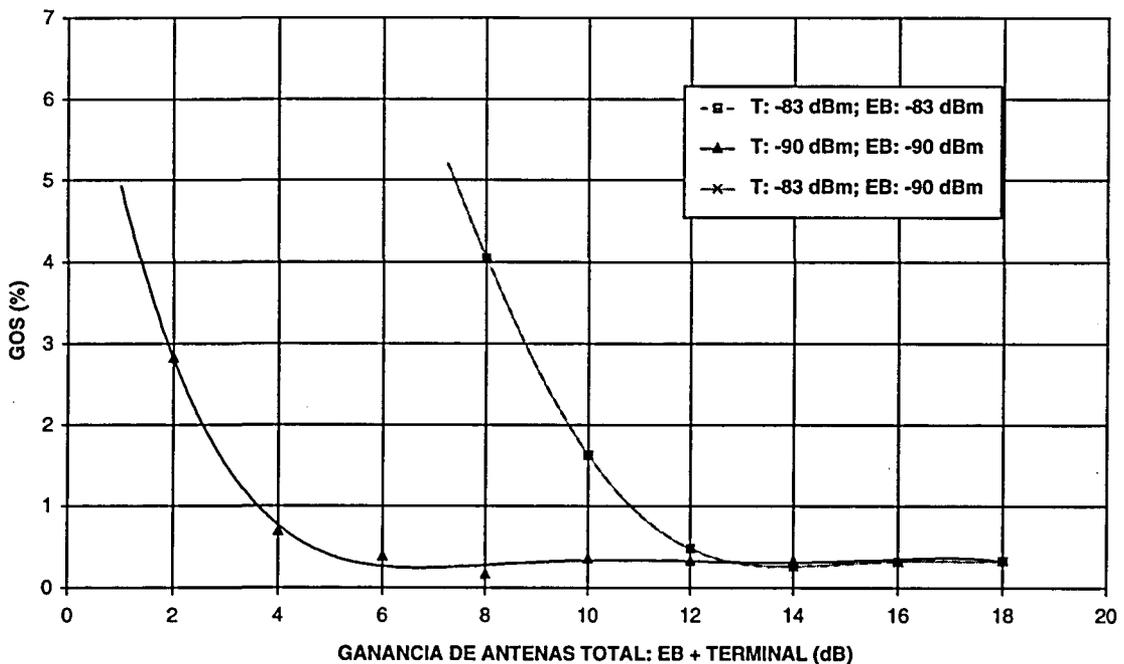


Figura 6.4.4 Efecto de la ganancia de antena considerando pérdidas por sensibilidad cuando el grado de servicio sin considerar pérdidas por sensibilidad es de 0.33 %.

La tendencia común de todos los escenarios es que pierden mucha calidad cuando la ganancia de antena es baja y que la sensibilidad de los receptores no influye cuando se dispone de suficiente potencia transmitida. Con esta premisa se puede actuar de dos formas. La primera es disponer de una ganancia de antena media, con algunas pérdidas por sensibilidad, y despreciar aquellas llamadas que puedan aparecer fuera de cobertura suponiendo que, en un sistema RLL, no se instalarán abonados en lugares donde no se obtenga suficiente potencia [ETR310]. La segunda es tener de suficiente ganancia de antena para no tener pérdidas por sensibilidad. El objetivo del presente estudio es evaluar sistemas que están limitados por interferencias y buscar métodos de combatirlos. El tema de la sensibilidad, puede solucionarse simplemente aumentando la potencia o disminuyendo las distancias entre emplazamientos de estaciones base, por lo que es un problema que queda al margen del estudio.

En la gran mayoría de casos, las llamadas que reciben menor potencia son también las que disponen de peor relación C/I. Si utilizamos el primer método para evitar pérdidas por sensibilidad, simplemente despreciamos estas llamadas que, al tener menor C/I, son las que tienen máxima probabilidad de ser interrumpidas. Con el segundo método aumentamos su potencia dejando fija su relación C/I y sin eliminarlas del sistema. La consecuencia del primer método es que elimina las peores conexiones por lo que las estadísticas de calidad del sistema mejoran respecto al segundo caso. Para evitar este incremento de calidad artificial los resultados del sistema RLL presentados en este estudio disponen de una ganancia de antena suficientemente elevada para combatir la falta de potencia.

En los resultados de la figura 6.4.4 observamos que la tendencia del sistema para sensibilidades de los receptores de -83 dBm y -90 dBm es la misma. Simplemente, al mejorar la sensibilidad de los mismos se requiere de menor ganancia de antena. La mejora en dBm de la sensibilidad corresponde al excedente de ganancia de antena en dB. Para receptores con -83 dBm se requiere una ganancia total de antenas mínima de 14 dB para que la sensibilidad no afecte a los resultados, para receptores con -90 dBm de sensibilidad la ganancia mínima es de 7 dB.

El caso asimétrico, donde los terminales tienen una sensibilidad de -83 dBm y las estaciones base, de más altas prestaciones, la tienen de -90 dBm, se comporta exactamente igual que cuando todos los receptores tienen -83 dBm de sensibilidad. La causa es que la potencia de los dos enlaces de la comunicación es la misma y el enlace más restrictivo es quien limita la conexión, que es en ambos casos el terminal de abonado.

Según el modelo de propagación utilizado, la potencia transmitida, la ganancia total de antena y la sensibilidad del receptor, el punto más alejado de la estación base dispone del siguiente margen de protección contra la atenuación por sombras:

$$\text{Margen protección} = P_{\text{transmisión}} + G_{\text{antenas}} - L_{\text{propagación}} - \text{Sensibilidad}$$

Si tomamos una sensibilidad típica de los receptores DECT de -83 dBm y una ganancia total de antenas de 14 dB:

$$\text{Margen protección} = 24 \text{ dBm} + 14 \text{ dB} - (23 + 35 \log (346.4)) \text{ dB} + 83 \text{ dBm}$$

$$\text{Margen protección} = 9.1 \text{ dB}$$

Según se comentó en el punto 6.4.1.2 la atenuación por sombras puede llegar a valer hasta 24 dB. Por lo cual existe una cierta probabilidad de que la atenuación por sombras sobrepase el valor de 9.1, sin embargo en la figura 6.4.4 no se advierte ninguna pérdida de calidad respecto al caso de que no se tengan en cuenta las llamadas perdidas por sensibilidad. Ambos escenarios tienen un GOS del 0.33 %. Este efecto es debido a que aquellos terminales que no pueden engancharse a la estación base más próxima debido a que tienen una fuerte atenuación por sombras con ella, existirá con alta probabilidad otra estación base con un factor de sombras más favorable a la que sí que podrán conectarse. Como resultado se tiene que un cierto número de llamadas no se enganchan a la estación base más próxima sino a otra más alejada.

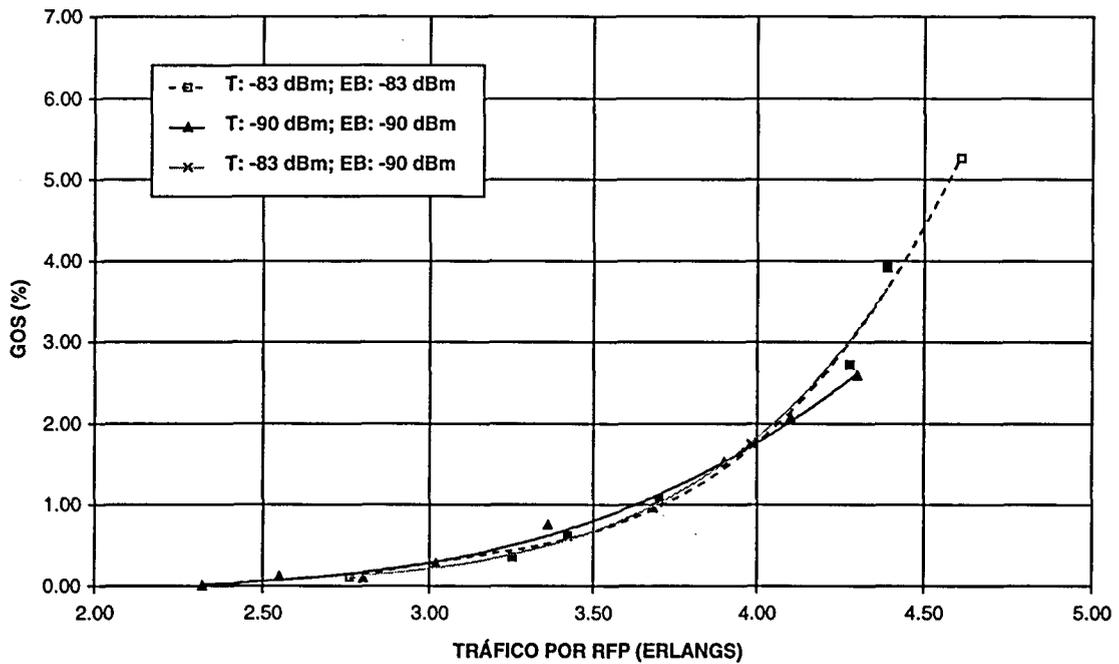


Figura 6.4.5 Efecto de la sensibilidad del receptor sobre el grado de servicio cuando se dispone de suficiente ganancia de antena.

En la figura 6.4.5 se observa que la capacidad del sistema anterior es exactamente igual para diferentes sensibilidades de receptor siempre y cuando se disponga de suficiente ganancia de antena, para este caso se han dispuesto 16 dB de ganancia total.

Analizando los resultados anteriores se ha considerado que el sistema RLL no debe incorporar las pérdidas por falta de potencia en sus estadísticas. Por ello se supone, para todos los casos de sistema RLL del presente estudio, una ganancia total de antenas igual a 16 dB (2 dB por encima del mínimo requerido) y una sensibilidad de los receptores de estación base y terminal de -83 dBm.

En el apartado 6.4.1.3 se describe como se tratan los desvanecimientos rápidos debidos a efectos multicamino: se añade un margen de protección a la relación C/I mínima y no se tienen en cuenta a lo largo de la simulación. En realidad los desvanecimientos multicamino afectan a las diferentes componentes de la relación C/I de forma independiente. Así, cuando la señal afectada es la deseada tendremos un decremento de la relación C/I que puede compensarse con el margen adicional provisto. Mientras que si el desvanecimiento afecta a una señal interferente, la potencia interferente total prácticamente no altera su valor ya que es la suma de varias señales. Sin embargo los desvanecimientos multicamino también pueden interrumpir una llamada por una atenuación adicional no contemplada en el modelo de propagación, de forma que la potencia recibida no supere la sensibilidad del receptor. En los resultados presentados este último efecto no se tienen en consideración debido a que las pérdidas que pueden ocasionar estos desvanecimientos pueden compensarse añadiendo un margen suplementario de ganancia en las antenas.

6.4.1.5 Efecto de la separación de estaciones base

La separación de estaciones base viene establecida, básicamente, por dos factores: la densidad de abonados y la potencia de los transmisores. Una de las características de los sistemas celulares es que para aumentar el tráfico cursado se incrementa la densidad de estaciones base y reduciendo el radio de las células. En los sistemas DCA, esta operación resulta sumamente sencilla ya que no debe planificarse la nueva distribución de frecuencias, simplemente se instalan más estaciones base y el sistema se adapta automáticamente. La disminución del radio de las células también permite la utilización de menor potencia de transmisión, con la consecuente prolongación de la duración de las baterías.

Para la evaluación de un sistema RLL con el modelo de propagación descrito en los puntos anteriores, el tamaño de las células resulta irrelevante ya que no influye en la relación C/I . Un escalado de todas las distancias del sistema conserva la misma C/I . Solamente influye en la cantidad de potencia recibida que se considera suficiente, debido a que se dispone de la ganancia de antena necesaria en todos los casos.

En la figura 6.4.6 se representan los resultados de capacidad que soportan 3 sistemas con diferente separación entre estaciones base. Puede observarse que todos ellos son idénticos por lo que la distancia entre estaciones base no afecta a nuestro sistema.

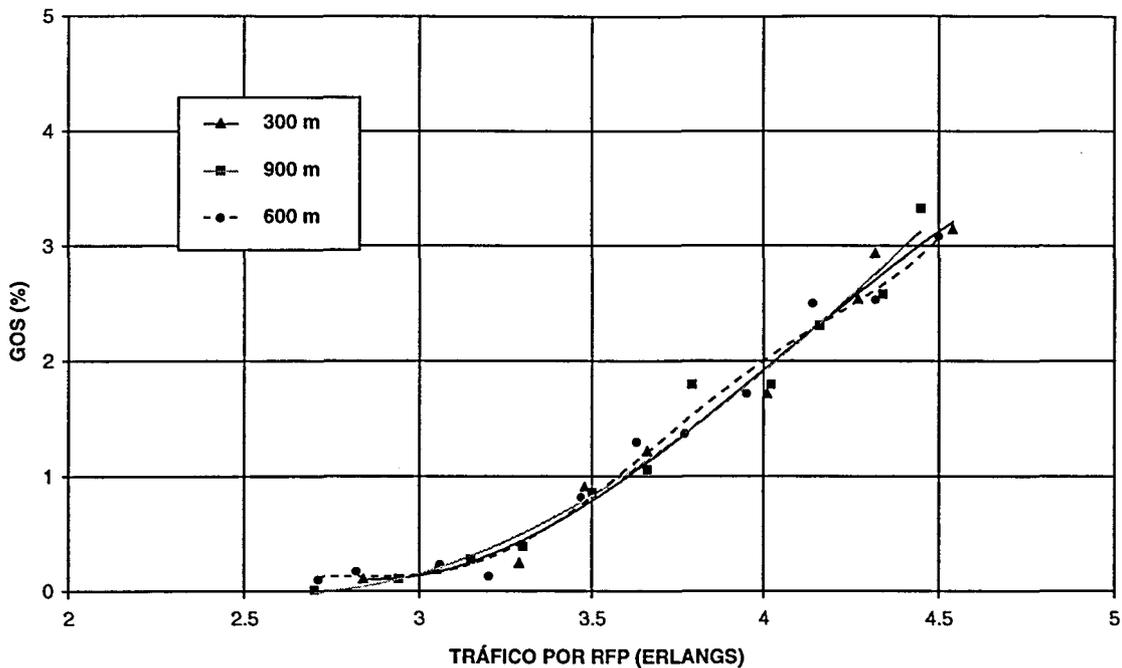


Figura 6.4.6 Efecto de la separación entre estaciones base cuando se dispone de suficiente ganancia de antena.

Para realizar las simulaciones del sistema RLL se ha considerado una distancia entre estaciones base de 600 m.

6.5 CAPACIDAD DEL ESTÁNDAR DECT UTILIZADO COMO SISTEMA DE BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

El primer caso sometido a estudio, es el caso básico en el cual todas las antenas de las estaciones base y terminales son omnidireccionales. En la figura 6.5.1 se observa la capacidad del sistema cuando se utiliza una parte del espectro o el total.

Para un sistema con 3 frecuencias el resultado es bastante pobre ya que cada estación base con 12 slots, sólo consigue cursar 1.8 Erlangs, siempre para un GOS del 1 %. La limitación por falta de canales se encuentra en 5.8 Erlangs, por lo que el sistema se ve limitado por interferencias. Considerando que el escenario simulado dispone de 100 RFP's, el número total de llamadas que se cursan simultáneamente es de 180. Empleando 36 canales, tenemos que cada canal es utilizado por 5 llamadas al mismo tiempo, lo que representa que cada llamada está interferida por otras 4. Comparando este sistema con su equivalente FCA, las agrupaciones de estaciones base o *clusters* estarían formados por 20 estaciones base (100 estaciones base / 5 estaciones base co-canal).

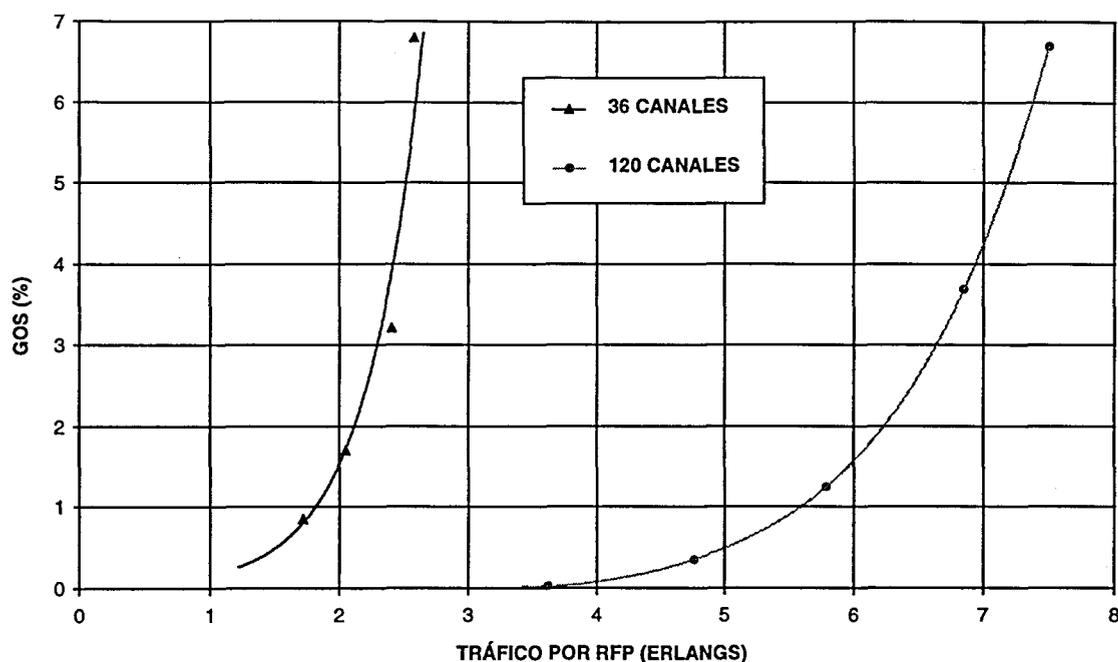


Figura 6.5.1 Capacidad del sistema RLL utilizando antenas omnidireccionales.

Al realizar estudios analíticos sobre capacidades de sistemas celulares, es usual aproximar el número de señales interferentes a las 6 más cercanas que forman la primera corona interferente y considerarlas además equidistantes de la señal deseada. En nuestro caso solamente se obtienen 4 interferentes, con lo cual la agrupación obtenida no es completamente comparable al de un sistema FCA, y nos hace suponer que para sistemas con mayor número de estaciones base, la capacidad del sistema puede disminuir aún más. Para obtener más interferencias será preciso aumentar el número de estaciones base ubicadas en el área de simulación.

Cuando se dispone de un entorno con el espectro completo, 120 canales, la reutilización de cada canal dentro del área de simulación debe seguir siendo el mismo. En este caso el límite de capacidad del sistema marcado por las interferencias está en:

$$120 \text{ canales} * 5 \text{ llamadas co-canal} / 100 \text{ RFP} = 6 \text{ Erlangs por RFP}$$

Se obtiene una capacidad superior a la que permiten el número de canales, por lo que en este caso la limitación es por capacidad. En la figura 6.5.1 puede verse realmente que la capacidad del sistema está cercana a los 5.8 Erlangs por estación base.

El sistema con antenas omnidireccionales es el que requiere una distancia de reuso mayor y un escenario con 100 estaciones base con el modelo propuesto, no permite obtener el número de llamadas interferentes suficientes para poder extrapolar el

modelo simulado a un plano infinito. Para este caso se ha realizado un estudio con un área que dispone de más estaciones base.

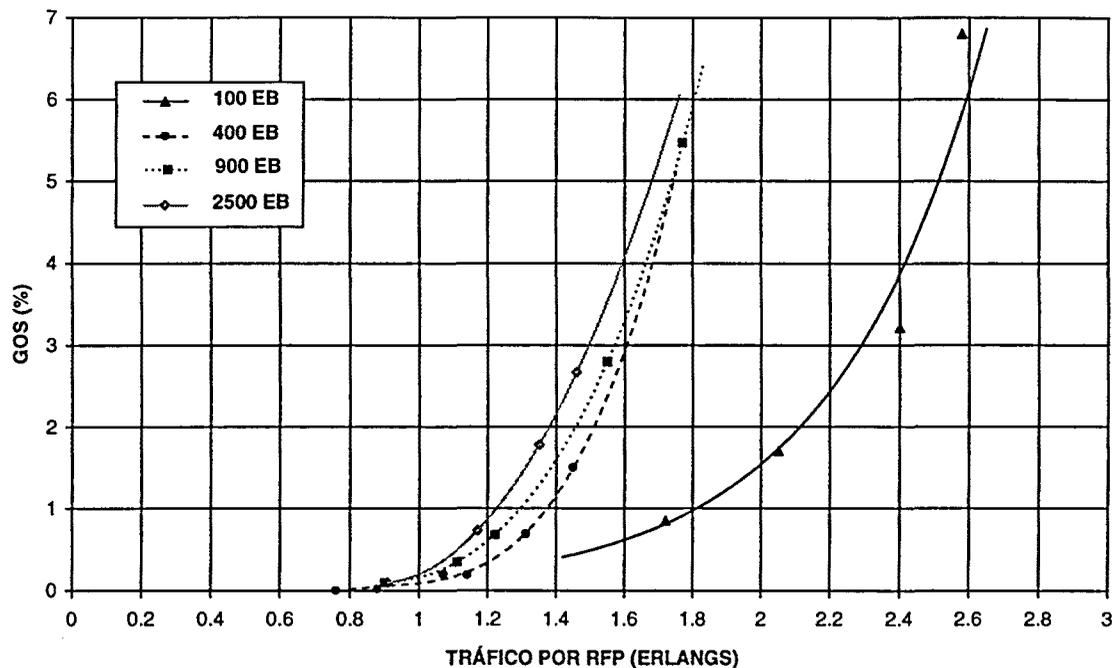


Figura 6.5.2 Variación de la capacidad del sistema dependiendo del número de emplazamientos de estación base para 36 canales.

En la figura 6.5.2 se observa como la capacidad de un sistema con 36 canales y 100 estaciones base decrece de los 1.8 Erlangs por RFP hasta los 1.37 cuando se utilizan 400 estaciones base, hasta los 1.3 para 900 y 1.23 para 2500. En este último caso el número de células co-canal ubicadas en el área de simulación es de $1.23 \times 2500 / 36 = 80$, por lo que ya puede considerarse que un aumento del número de estaciones base no altera el resultado.

Se han publicado estudios de la capacidad de la aplicación de bucle de abonado vía radio utilizando el DECT [ABU], [AKE], [SAN], [BON2] y [ETR310] que utilizan diferentes hipótesis a la hora de modelar el canal radio empleado. Esta variedad de hipótesis conduce a diversidad en los resultados. Un punto en el que todos ellos coinciden es que, una aplicación de bucle de abonado vía radio, no requerirá de un número extenso de emplazamientos de estación base debido a su alto coste. Su principal aplicación está en áreas limitadas, de varios kilómetros cuadrados, que pueden cubrirse con un número razonable de estaciones base utilizadas con la mayor eficiencia posible. El caso de 100 emplazamientos está situado en el límite superior de los estudiados en las citadas referencias por lo que es considerado significativo, siempre y cuando pueda aumentarse la capacidad por RFP.

El hecho de que en sistemas con antenas omnidireccionales se requieran más de 100 emplazamientos de estación base para lograr aproximar un plano infinito, es debido a que el tráfico cursado por cada una de ellas es muy bajo y no se logra alcanzar el número de estaciones base co-canal suficiente. En escenarios con mecanismos de control de interferencias, que cursan más tráfico por estación base, se requiere de un menor número de emplazamientos de estación base para conseguir el mismo efecto.

Atendiendo a los dos motivos expuestos:

- no se prevé implantar un sistema de RLL en un área infinita,
- sistemas que cursen más tráfico que el caso omnidireccional consiguen aproximarse mejor al caso de plano infinito,

se ha considerado apropiado utilizar un escenario con 100 emplazamientos de estación base para obtener todos los resultados presentados a continuación. De todas formas existen algunos estudios en que se consideran pocas estaciones base para modelar áreas de tamaño reducido como por ejemplo plazas en ciudades [SAN]. En ellas se consiguen capacidades superiores a las que se obtendrían si se consideraran áreas cubiertas con mayor número de estaciones base.

6.5.1 UTILIZACIÓN DE ANTENAS DIRECTIVAS

La eficiencia que proporciona el sistema con antenas omnidireccionales y 3 frecuencias es demasiado pobre para ser rentable en una explotación real. Sólo se consiguen 1.8 Erlangs por RFP con 12 canales, es decir una utilización por canal del 15 %. La técnica más inmediata para aumentar la capacidad del sistema es instalar antenas directivas en los equipos radio.

La utilización de antenas directivas en la estación base no comporta ninguna complejidad añadida. El sistema se adapta de forma automática dividiendo el área de cobertura de las células en varios sectores cuyas fronteras vienen marcadas por los diagramas de radiación de dichas antenas.

En los escenarios estudiados se han dispuesto, por cada emplazamiento de estación base, el número de estaciones base o RFP's con antenas directivas necesario para cubrir toda el área anteriormente cubierta por una antena omnidireccional. De esta forma se ubican 3 estaciones base con antenas de 120° en cada emplazamiento de estaciones base o 6 de 60°.

En sistemas de comunicaciones celulares con terminales móviles, se utilizan antenas omnidireccionales en los terminales debido a que la dirección entre la estación base y el usuario cambia continuamente. En un sistema de bucle de abonado vía radio el terminal es estático y en consecuencia siempre tiene su mejor estación base situada en la

misma dirección. En este caso es lógico instalar antenas directivas en los terminales, apuntando de forma permanente hacia la estación base.

Las figuras 6.5.3 y 6.5.4 presentan los resultados de varias configuraciones del sistema con diferentes diagramas de radiación de antenas. Examinando primero las situaciones con antenas omnidireccionales en las estaciones base, se observa una fuerte tendencia a aumentar su capacidad con la directividad del terminal. En caso de utilizar antenas de 60° se llega a obtener 5.8 Erlangs por RFP, límite que no se puede superar debido a la falta de canales en la estación base. Para incrementar el tráfico cursado se debería disponer de más transceptores por RFP.

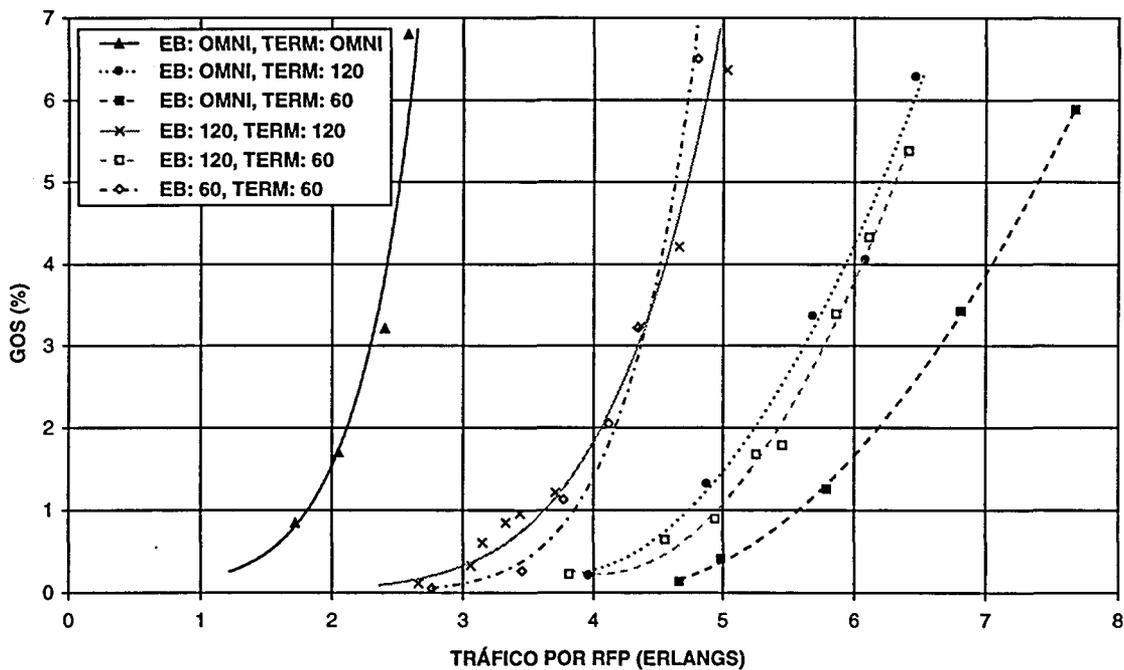


Figura 6.5.3 Capacidad por RFP de un sistema RLL con antenas directivas y 36 canales disponibles.

En infraestructuras con antenas directivas en las estaciones base se cursa menos tráfico en cada una de ellas que con antenas omnidireccionales cuando parece que debería cursarse más. El motivo de este hecho es que el sistema está, globalmente, cursando más tráfico debido a que en cada emplazamiento de estaciones base coexisten varias. En la figura 6.5.4 puede verse como el tráfico cursado por cada *cell site* o emplazamiento de estaciones base aumenta cuanto más directivas sean las antenas del sistema. Para antenas de 120° en ambos extremos el tráfico cursado por emplazamiento de estaciones base para un GOS del 1 % pasa a ser 10.5 Erlangs, aumenta el 583 % respecto al caso omnidireccional. Si se dispone de antenas de 60°, se pueden cursar 23 Erlangs por emplazamiento de estaciones base, un 1280 % de incremento sobre sistemas con antenas omnidireccionales [CAS1], [CAS3]. En [CAS2] se presenta un entorno similar pero la asignación del factor de sombras en un terminal es idéntico para todas las

estaciones base. Como ya se comentó, esta circunstancia penaliza a la relación C/I decrementando el tráfico del sistema.

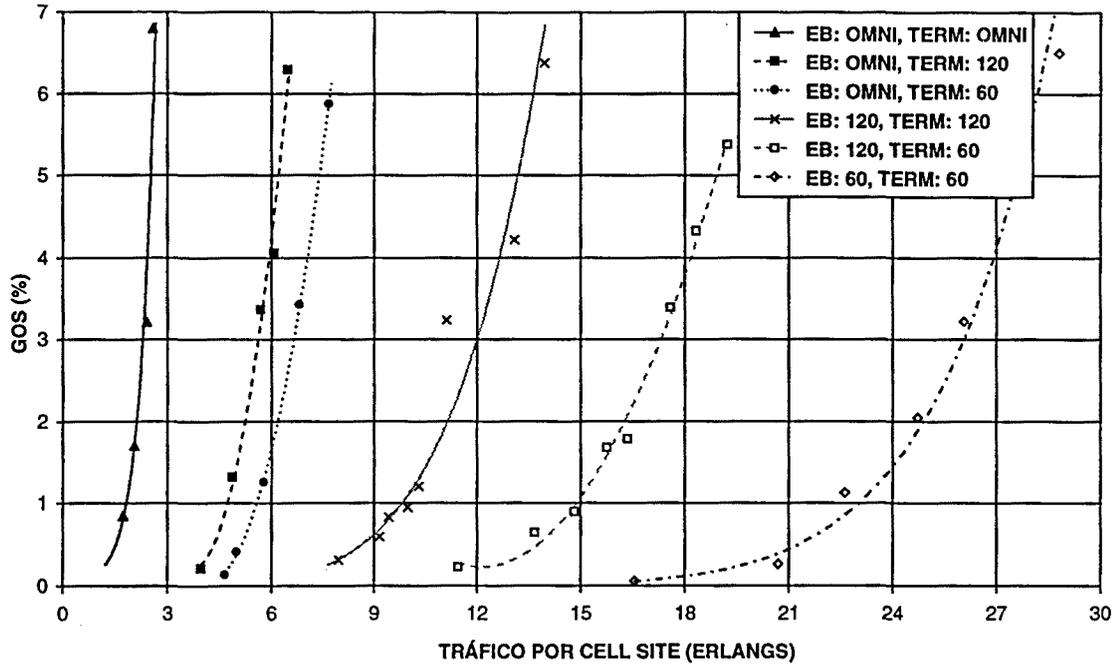


Figura 6.5.4 Capacidad por emplazamiento de estación base de un sistema RLL con antenas directivas y 36 canales disponibles.

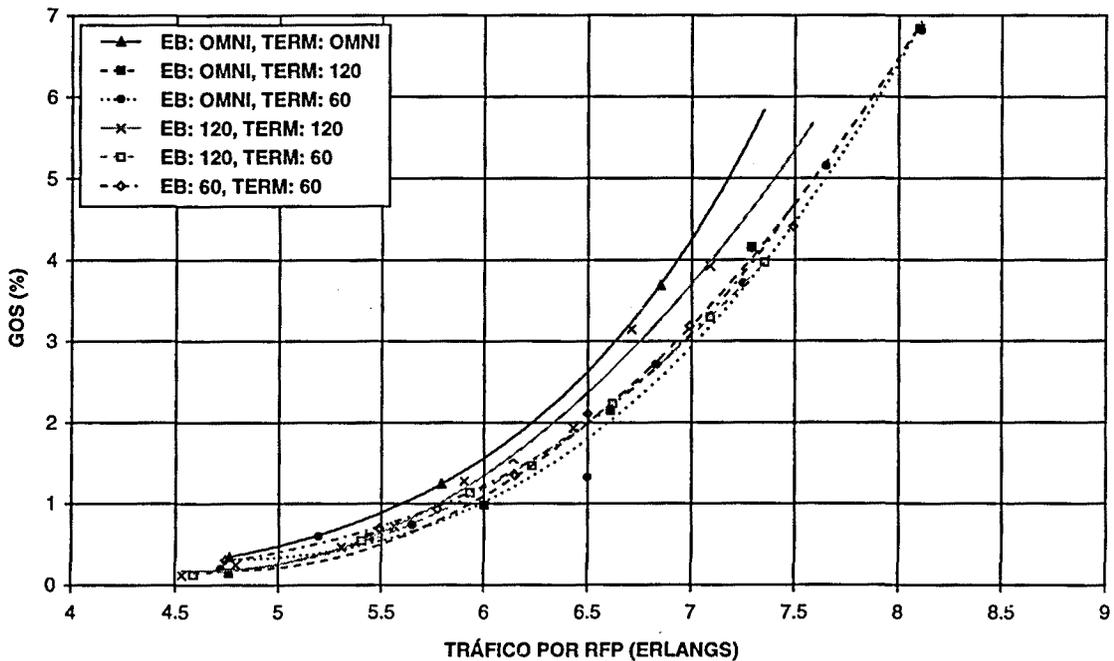


Figura 6.5.5 Capacidad por RFP con antenas directivas y 120 canales disponibles.

En todos los casos con antenas directivas en las estaciones base, la limitación del sistema está en la interferencia co-canal y no en la falta de canales. Para aumentar la capacidad del sistema es posible utilizar todas las frecuencias de que dispone el estándar DECT.

En la figura 6.5.5 se observa la capacidad de cada RFP cuando el sistema puede acceder a las 10 frecuencias del DECT. Prácticamente en todos los casos nos acercamos al límite impuesto por el número de canales: 5.8 Erlangs por RFP. Estamos, consecuentemente, en un sistema poco interferido por lo que se pueden instalar más transceptores por estación base.

El tráfico global por *cell site* en este escenario (figura 6.5.6) es directamente proporcional al número de RFP's que estén ubicadas en cada *cell site* ya que todas las configuraciones cursan cerca de 5.8 Erlangs por RFP. Obtenemos, en el mejor de los casos, 35 Erlangs por emplazamiento.

Como se ha comentado anteriormente, cuando disponemos de antenas directivas y 120 canales, el sistema resulta claramente limitado por falta de canales en las estaciones base. Para mejorar la capacidad es preciso disponer de más transceptores en ellas. En la figura 6.5.7 se estudia, para el caso de tener antenas directivas de 120° en todos los equipos radio y 3 RFP por *cell site*, el efecto que produce introducir estos nuevos transceptores.

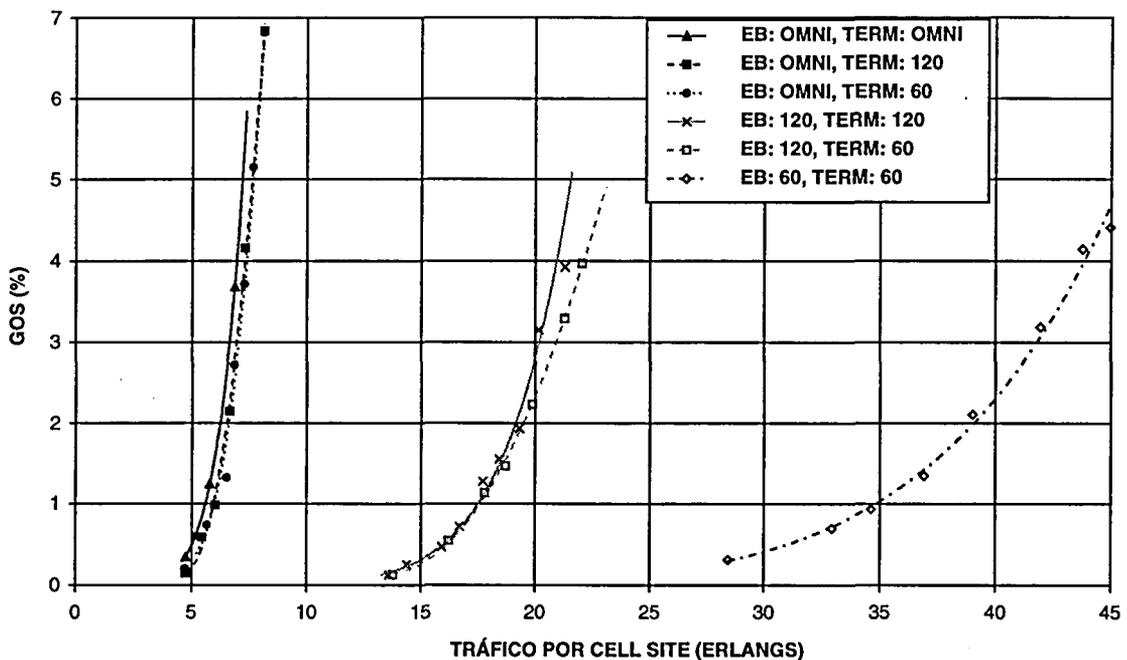


Figura 6.5.6 Capacidad por emplazamiento de estación base de un sistema RLL con antenas directivas y 120 canales disponibles.

Cuando se tienen 2 transceptores por estación base que representan 24 canales, cada RFP llega a cursar 13.9 Erlangs. El límite calculado a través de la fórmula de Erlang-B para estos 24 canales es de 15.3 Erlangs, lo que nos indica que el sistema está ligeramente limitado por interferencia. De todas formas se añade un tercer transceptor obteniéndose 15.25 Erlangs por estación base, en este caso el sistema se encuentra limitado sin lugar a dudas por interferencia. El tráfico cursado por cada emplazamiento de estación base es el triple del comentado, es decir 41.7 Erlangs para 2 transceptores y 45.9 para 3.

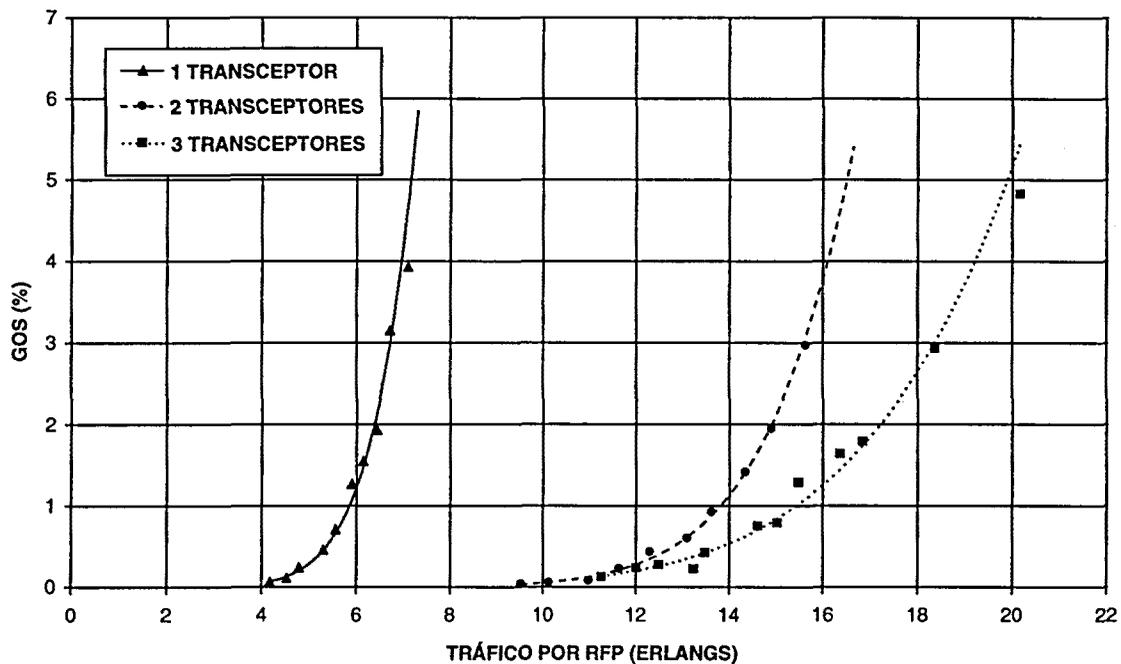


Figura 6.5.7 Capacidad por RFP cuando se disponen de varios transceptores por RFP, 120 canales y antenas de 120° en todos los equipos radio.

En tabla 6.5.1 podemos ver una recapitulación de los resultados presentados hasta el momento. Como conclusión puede decirse que el sistema DECT si se traslada directamente y sin ningún tipo de modificación desde un entorno de interiores, donde las antenas son omnidireccionales, a una aplicación RLL, en exteriores, tiene una eficiencia muy pobre y no resulta rentable su explotación. Un factor que limita la capacidad del sistema es el hecho de que varios operadores tengan que repartirse la banda de frecuencias, no pudiendo disponer de las 10 que tiene el estándar. De esta forma se han realizado simulaciones para 3 y 10 frecuencias, resultando la capacidad de las primeras de 2 a 4 veces inferior a la de las segundas, dependiendo del tipo de antenas y transceptores utilizados. El poder disponer de un número determinado de frecuencias no depende del operador sino de la entidad encargada de gestionar el espectro radioeléctrico de la zona de operación. Aunque para el estándar DECT la banda actual asignada sea de acceso libre en España, esta condición puede cambiar ya que en un principio estaba pensada para su utilización en el interior de edificios y no para áreas

abiertas. De esta forma no puede condicionarse el aumento de la capacidad del sistema a un incremento de canales y deben buscarse vías alternativas.

	eb: omni ter: omni frec: 3 trans: 1	eb: 120 ter: 120 frec: 3 trans: 1	eb: omni ter: omni frec: 10 trans: 1	eb: 120 ter: 120 frec: 10 trans: 1	eb: 120 ter: 120 frec: 10 trans: 2	eb: 120 ter: 120 frec: 10 trans: 3
Tráfico por <i>Cell site</i>	1.8 Er.	10.5 Er.	5.7 Er.	17.4 Er.	41.7 Er.	45.9 Er.

Tabla 6.5.1 Capacidad por emplazamiento de estación base de diferentes configuraciones del sistema para un GOS del 1 %.

La forma más sencilla de aumentar la capacidad del sistema es instalar antenas directivas en los equipos de los abonados, que al ser estáticos sólo es necesario apuntar la antena en el momento de la instalación de los equipos. El segundo paso es sectorizar las células también con antenas directivas. De esta forma se consigue reducir el número de interferencias que son vistas por los receptores incrementando además la densidad de estaciones base.

El caso más típico de sectorización de células en áreas abiertas se realiza con antenas de 120° dividiendo las células en tres sectores. Solamente en casos extremos de necesidad de muy alta capacidad se instalan células de 6 sectores ya que la infraestructura requerida en las antenas resulta bastante aparatosa. En nuestro entorno si se observa el tráfico cursado por los dos sistemas siguientes: 6 sectores de 60°, terminales de 60°, 1 transceptor por estación base; y 3 sectores de 120°, terminales de 120°, 2 transceptores por estación base; puede comprobarse que los dos son equivalentes en cuanto al número de transceptores pero su comportamiento es diferente. El sistema con 6 sectores está limitado totalmente por capacidad y es capaz de cursar 35 Erlangs por *cell site*, el sistema con 3 sectores y 2 transceptores por sector está limitado tanto por capacidad como por interferencia pero es capaz de cursar 41.7 Erlangs por *cell site*. Esta mejora se debe a que las estaciones base con dos transceptores son equivalentes a un grupo de 24 canales mientras que 2 sectores con estaciones base independientes con un solo transceptor son equivalentes a 2 grupos de 12 canales. En el primer caso, los canales de los dos transceptores se pueden compartir mientras que en el segundo no, de esta forma el primer grupo disfruta de una menor probabilidad de bloqueo a igual tráfico cursado.

Como conclusión podemos decir que una solución para combatir interferencias es disminuir la anchura de los diagramas de radiación, pero sólo hasta cierto límite ya que la infraestructura en los emplazamientos de antena se hace cada vez más compleja. A partir de ese punto resulta más eficiente intentar reducir el impacto de las interferencias con otras técnicas en lugar de reducir más el diagrama de radiación de las antenas. Si la limitación se debe a la falta de canales en las estaciones base se instalarán más transceptores en cada una de ellas. Para estudiar el comportamiento de diferentes

sistemas y métodos de control de interferencias se escogerá normalmente un sistema con 3 frecuencias, antenas directivas de 120° en todos los equipos radio y emplazamientos de estaciones base con tres sectores. Como se ha comentado anteriormente, para que los resultados sean representativos, en el área de simulación deben coexistir un cierto número de conversaciones utilizando el mismo canal. El uso de antenas directivas, permite cursar un nivel de tráfico que cumple estas condiciones. El hecho de utilizar solamente 3 frecuencias permite llegar a un sistema limitado por interferencias con menos tráfico que uno de 10 frecuencias, reduciendo de esta forma el tiempo de computación y siendo su comportamiento equivalente.

6.6 TÉCNICAS DE CONTROL DE INTERFERENCIA PARA UN SISTEMA DE BUCLE DE ABONADO VÍA RADIO

El principal problema que presenta el DECT utilizado como RLL es su alta sensibilidad a las interferencias. Para aumentar la capacidad del sistema deben introducirse mecanismos de control de estas interferencias, ya que el otro factor que puede limitar la capacidad del sistema, la falta de canales, puede compensarse añadiendo más transceptores en las estaciones base.

6.6.1 CONTROL DE POTENCIA

La mayoría de los sistemas celulares existentes vienen usando técnicas de control de potencia en el terminal para reducir la interferencia del propio sistema, ahorrar batería y evitar la saturación de los receptores debido a una excesiva potencia recibida. En un sistema RLL, el ahorro de batería no es el motivo principal ya que disponemos de una conexión permanente a la red eléctrica. En este caso la principal ventaja de un control de potencia es la reducción de la interferencia co-canal, primera razón restrictiva del sistema. En todo sistema sin control de potencia la mayoría de conexiones disfrutan de una relación C/I superior a la estrictamente necesaria para mantener la comunicación, parece obvio que se obtendrá algún incremento de capacidad reduciendo la potencia transmitida en estas conexiones [GRAN], [ISH].

Básicamente, vienen publicándose resultados de dos tipos de algoritmos de control de potencia. El primero está basado en el principio de que la potencia transmitida debe reducirse al igual que se reducen las pérdidas de propagación. El más simple y utilizado de estos algoritmos mantiene una potencia recibida constante en el receptor, es decir, se compensan las pérdidas totales de propagación. Aunque se ha visto que este método proporciona poca ganancia de capacidad [ALM]. El segundo tipo de algoritmos se basan en la calidad de la señal recibida. Debido a que la mayoría de

conexiones tienen un exceso de calidad o relación C/I, parece natural que la potencia transmitida se reduzca en base a ésta. De entre todos los algoritmos de este tipo, el que mejor resultados ofrece es aquel que utiliza un esquema de control de potencia que da la misma calidad a todos los usuarios [ZAN], [FRO].

El estándar DECT, actualmente no tiene implementado ningún tipo de control de potencia ya que en los escenarios para los cuales estaba diseñado, interior de edificios, las interferencias co-canal ya están muy atenuadas por paredes o techos y el control de potencia no resulta en una mejora significativa. En un sistema de bucle de abonado este caso no se da y debe considerarse cualquier mecanismo que reduzca la potencia interferente recibida.

En este trabajo se han evaluado dos tipos de control de potencia: control de potencia de dos niveles y control de potencia basado en la relación C/I.

6.6.1.1 Control de potencia con dos niveles de potencia

Este método está basado en tener dos niveles de potencia transmitida diferentes: 80 mW y 250 mW. Las conexiones cuyos terminales se encuentren cerca de la estación base utilizan la potencia inferior y los que se encuentran lejos la superior. El control de potencia puede realizarse en el enlace de subida (1 enlace) o en ambos enlaces (2 enlaces). Cuando se realiza un control de potencia en un sólo enlace, se implementa en el enlace de subida por dos razones. La primera es que el enlace de subida es el más perjudicado por las interferencias, por lo cual las técnicas de control de interferencias resultan más justificadas. La segunda porque es más fácil de realizar un control de potencia de este tipo en el terminal que en la estación base. Nótese que en el extremo del terminal se tiene una antena directiva apuntando hacia la mejor estación base, ésta tiene que ser instalada por el operador que al mismo tiempo podría colocar un conmutador para seleccionar una u otra potencia. La utilización de control de potencia en la estación base resulta también bastante sencilla porque los terminales son estáticos. Cuando la estación base identifica qué terminal se está conectando, consulta una base de datos en la que está especificada la potencia a transmitir.

El umbral entre la transmisión de las dos potencias se sitúa en el punto donde, para un terminal situado en este punto y transmitiendo a 80 mW, su estación base recibe la misma potencia que para otro terminal situado en el borde de la célula y transmitiendo 250 mW. Se ha tomado la distancia al borde de la célula igual a 300 m con lo que el umbral queda situado a 216.6 m.

En la figura 6.6.1 se muestra el comportamiento de un sistema con antenas de 120° en todos los equipos radio y 36 canales disponibles utilizando control de potencia de dos niveles. Como puede verse la ganancia lograda es bastante limitada, la capacidad se incrementa en apenas un 10 % utilizando control de potencia en ambos enlaces. La causa de esta conducta es que en un sistema sin control de potencia la peor área para los

terminales es obviamente la frontera exterior, las llamadas que aparecen en estas posiciones tienen una mayor probabilidad de bloqueo o interrupción. Si se tiene un sistema con control de potencia de dos niveles, se cancela cierta interferencia pero aparecen dos áreas con alta probabilidad de bloqueo o interrupción: la frontera exterior antes comentada y el área cercana al umbral donde se transmiten 80 mW. Estos dos efectos se compensan mutuamente y el resultado es la no variación de la capacidad de tráfico.

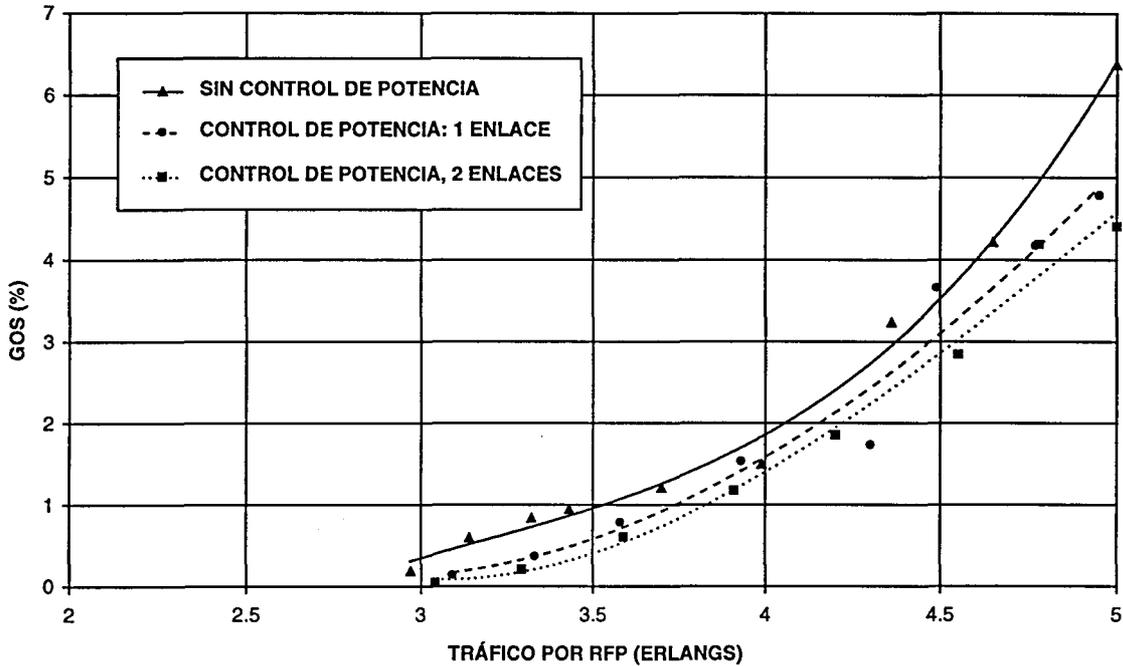


Figura 6.6.1 Control de potencia con 2 niveles.

6.6.1.2 Control de potencia basado en la relación C/I

Este tipo de control de potencia se basa en intentar asignar la misma probabilidad de bloqueo e interrupción para todas las llamadas sea cual sea su posición. Para ello se requiere un control de potencia que no dependa de la distancia entre la estación base y el terminal sino de la relación C/I necesaria para mantener esta probabilidad. Si cada receptor mide su relación C/I, utilizando por ejemplo la BER conseguida, y transmite esta información al otro extremo de la comunicación, éste puede modificar su potencia transmitida ajustándola a la necesaria para que el receptor tenga una relación C/I determinada. Basándonos en este criterio, en el modelo simulado, cada transmisor radio transmite la potencia mínima necesaria para que el receptor consiga una relación C/I de 14 dB, pero con dos condiciones: la potencia máxima transmitida (sin tener en cuenta la ganancia de antena) es de 250 mW y que el receptor tiene que recibir como mínimo una potencia igual a su sensibilidad.

Entre los dos tipos de control de potencia comentados existe una diferencia básica en cuanto a la complejidad del sistema en funcionamiento y a su señalización. Con el control de potencia de 2 niveles el control de potencia se realizaba en la instalación de los equipos en el extremo del terminal y en al inicio de la comunicación en la estación base y no requería de ningún tipo de señalización. Con el nuevo modelo debe realizarse un seguimiento continuo del control de potencia durante toda la duración de la llamada y la transmisión de estos datos aumenta la señalización.

En los resultados presentados se han considerado dos tipos de receptores, unos de alta gama, más caros y por lo tanto solamente utilizados por las estaciones base, y otros de más bajo coste y que pueden instalarse tanto en el extremo del abonado como en la estación base. La diferencia entre ambos es su sensibilidad, mientras que los estándar tienen una sensibilidad de -83 dBm, los superiores la tienen de -90 dBm. Así mismo se han supuesto dos niveles de control de potencia, el realizado solamente en el enlace de subida (1 ENLACE) y el realizado en ambos enlaces (2 ENLACES).

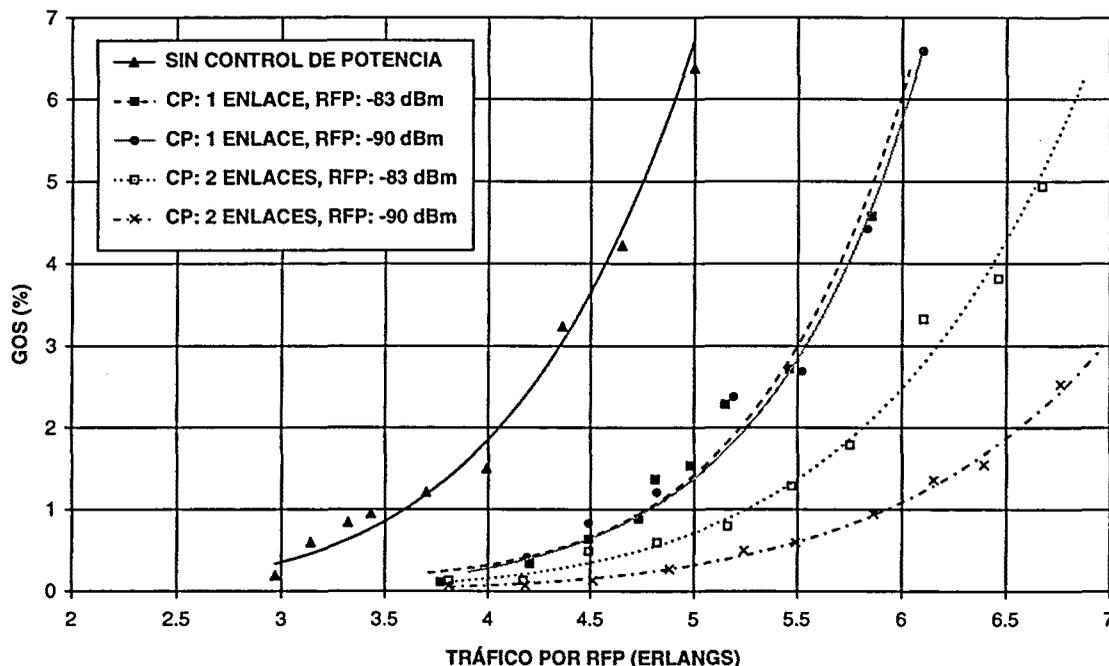


Figura 6.6.2 Control de potencia basado en la relación C/I.

La figura 6.6.2 se presentan los resultados obtenidos para un modelo con antenas de 120° en todos los equipos radio y 36 canales utilizados. En este caso sí que la capacidad de tráfico del sistema se ve significativamente incrementada. En el caso más sencillo, aplicando control de potencia en un sólo enlace y con receptores de sensibilidades de -83 dBm en ambos extremos se consigue pasar de 3.5 Erlangs por RFP a 4.7, lo que significa un incremento del 34 % respecto al caso original. Cuando se dispone de las máximas prestaciones del sistema, control de potencia en los 2 enlaces y receptores de -90 dBm en las estaciones base, el sistema pasa de estar limitado por

interferencia a estarlo por capacidad, consiguiéndose los 5.8 Erlangs que permiten los 12 canales para una probabilidad de bloqueo del 1 %, lo cual representa un incremento del 66 %. Si no se dispone de receptores de -90 dBm en las estaciones base, pero sí de control de potencia en ambos enlaces, se consigue una capacidad de 5.35 Erlangs por RFP, un incremento del 50 %. Cabe destacar que el hecho de incorporar receptores de -90 dBm cuando se tiene control de potencia en un sólo enlace no mejora el sistema respecto al caso de receptores con -83 dBm [CAS4].

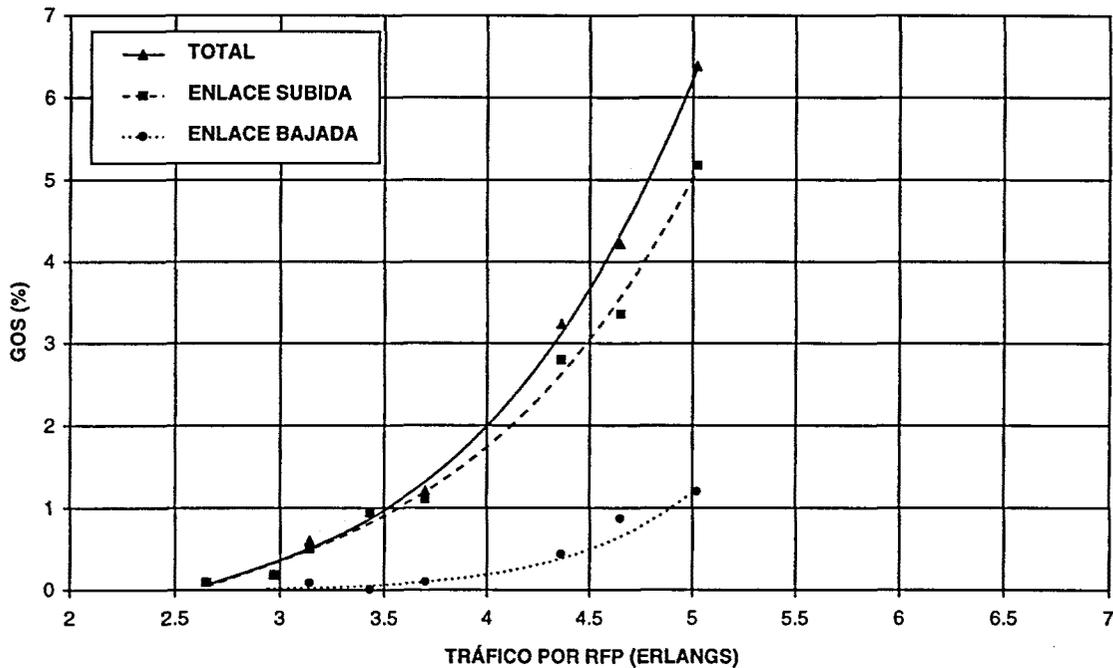


Figura 6.6.3 Análisis del comportamiento del sistema: Sistema sin control de potencia y sensibilidades de las estaciones base de -83 dBm.

En sistemas celulares, el enlace de subida y el de bajada suelen tener una relación C/I diferente. En el estándar DECT debido a que el terminal es quien escoge el canal a utilizar, el enlace de bajada tendrá normalmente una mejor relación C/I , con lo cual el factor limitativo es el canal de subida. En la figura 6.6.3 puede verse el GOS respecto del tráfico cursado por RFP para el sistema descrito pero sin control de potencia. En el sistema DECT, un terminal que quiere establecer una comunicación busca primero un canal de bajada, en este momento la llamada puede ser bloqueada por falta de canales en la estación base o por interferencias porque no existe ningún canal de bajada con la relación C/I mínima requerida. Si la llamada es bloqueada se contabiliza como GOS del canal de bajada. Cuando se ha encontrado un canal apto para el enlace de bajada se comprueba que también es apto para el enlace de subida, en este momento la llamada sólo la puede bloquearse debido a las interferencias y se contabiliza en el GOS de subida. Las llamadas interrumpidas se comportan de la misma forma.

En la figura 6.6.3 se observa como efectivamente la componente de mayor peso para el GOS total es la correspondiente al enlace de subida. Mientras que el citado enlace esta limitado por interferencias, al de bajada apenas le afectan.

Si se quiere aumentar la capacidad del sistema debe mejorarse el canal de subida. Por consiguiente, si se aplica un control de potencia a un sólo enlace tiene que ser al de subida. En la figura 6.6.4 puede verse que en el momento en que se aplica un control de potencia al enlace de subida, el GOS de éste enlace mejora sensiblemente. En estas circunstancias el sistema cursa un tráfico superior al de un sistema sin control de potencia resultando en un incremento de la interferencia global; el canal de bajada que antes no se veía afectado por este motivo, ahora sí que lo está y es quien limita el tráfico cursado.

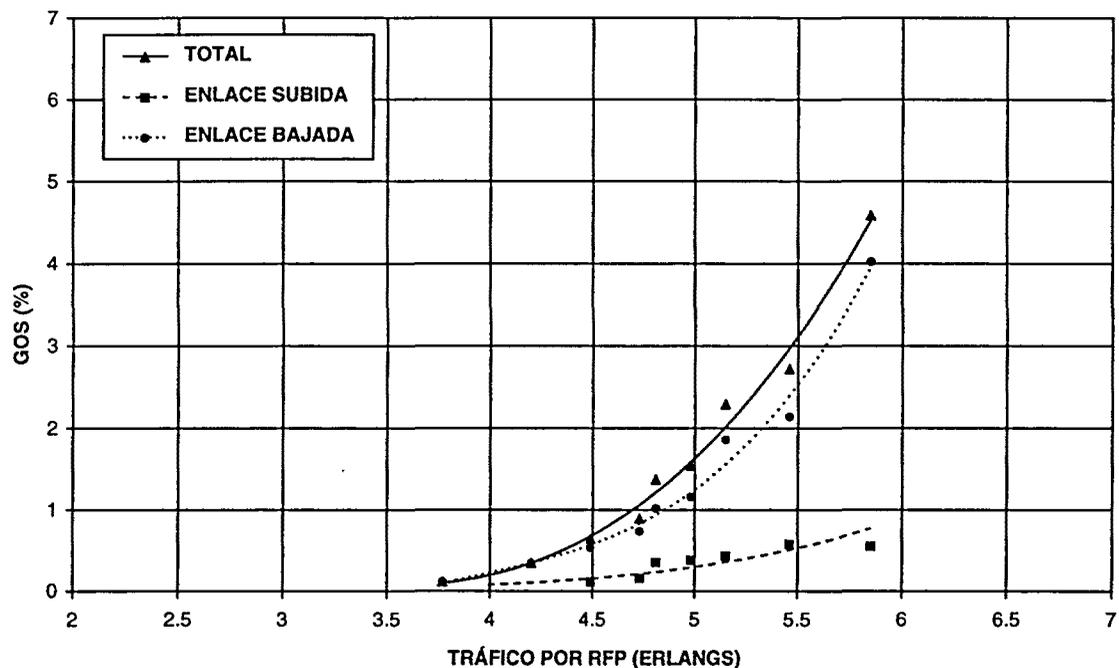


Figura 6.6.4 Análisis del comportamiento del sistema: Control de potencia en el enlace de subida y sensibilidades en las estaciones base de -83 dBm.

Cuando la sensibilidad de las estaciones base se mejora situándola en -90 dBm (figura 6.6.5), los terminales, que son los que están realizando el control de potencia, pueden rebajar más su potencia transmitida y se obtiene un margen adicional en la relación C/I del canal de subida, aumentando de esta forma su calidad. Sin embargo este beneficio no repercute en la capacidad del sistema ya que la limitación se encuentra en el enlace de bajada y no en el de subida.

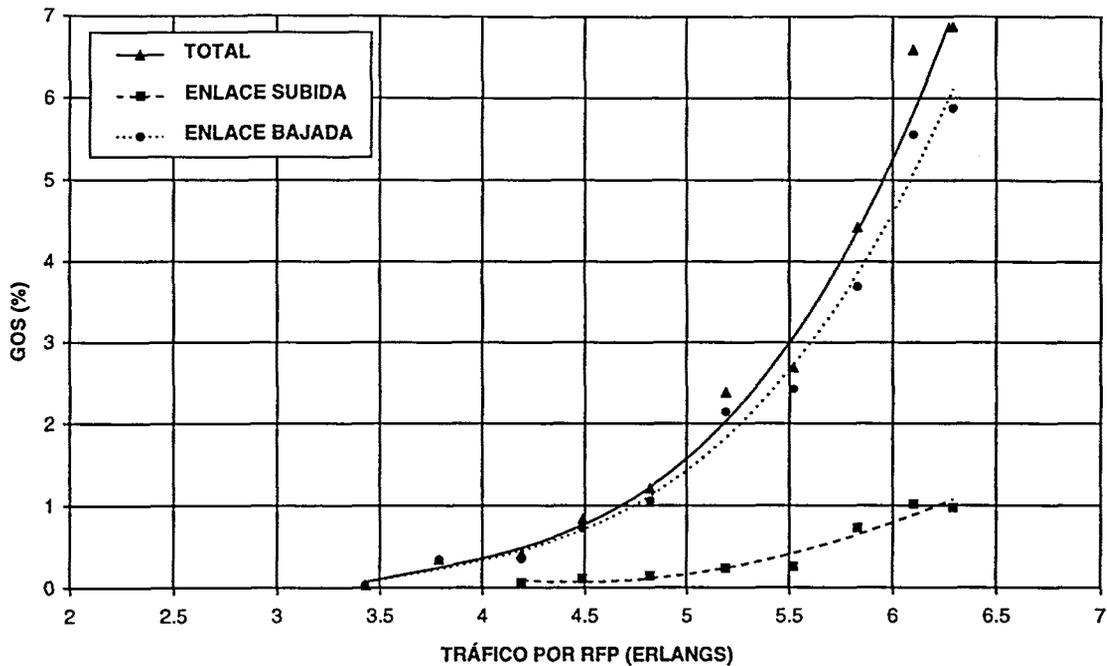


Figura 6.6.5 Análisis del comportamiento del sistema: Control de potencia en el enlace de subida y sensibilidades en las estaciones base de -90 dBm.

Para ganar más capacidad es posible aplicar el control de potencia en los dos enlaces. La figura 6.6.6 representa esta situación con receptores de estación base de sensibilidad igual a -83 dBm. Ahora las condiciones de los dos enlaces son las mismas por lo que el canal de subida tiene una peor relación C/I y es quien ve llamadas bloqueadas e interrupciones por interferencias de otros usuarios. En la figura se observa que el enlace de peor calidad es el de bajada, este efecto es debido a que las llamadas que no pueden establecerse debido a la falta de canales en la estación base se contabilizan aquí. También se observa que la capacidad de este canal no llega a los 5.8 Erlangs que permiten los 12 canales. La causa es que existe un cierto número de llamadas que solicitan un traspaso iniciado por la mala calidad del canal de subida, cuando el traspaso no puede realizarse por falta de canales, éste también se contabiliza como interrumpido en el enlace de bajada, aunque haya sido iniciado por el de subida. Como las interrupciones se ponderan por 10 en relación a las llamadas bloqueadas el GOS no llega al límite. Si mejoramos el canal de subida que es el que provoca los trasposos instalando receptores de sensibilidad -90 dBm en las estaciones base (figura 6.6.7), vemos que realmente mejoran los dos enlaces. El de subida porque se incrementa su relación C/I y el de bajada porque ya no se tiene que hacer cargo de las interrupciones bloqueadas por falta de canales debidas al enlace de subida. En estas circunstancias sí que el GOS del canal de bajada es de 5.8 Erlangs, siendo íntegramente causado por llamadas bloqueadas en establecimiento.

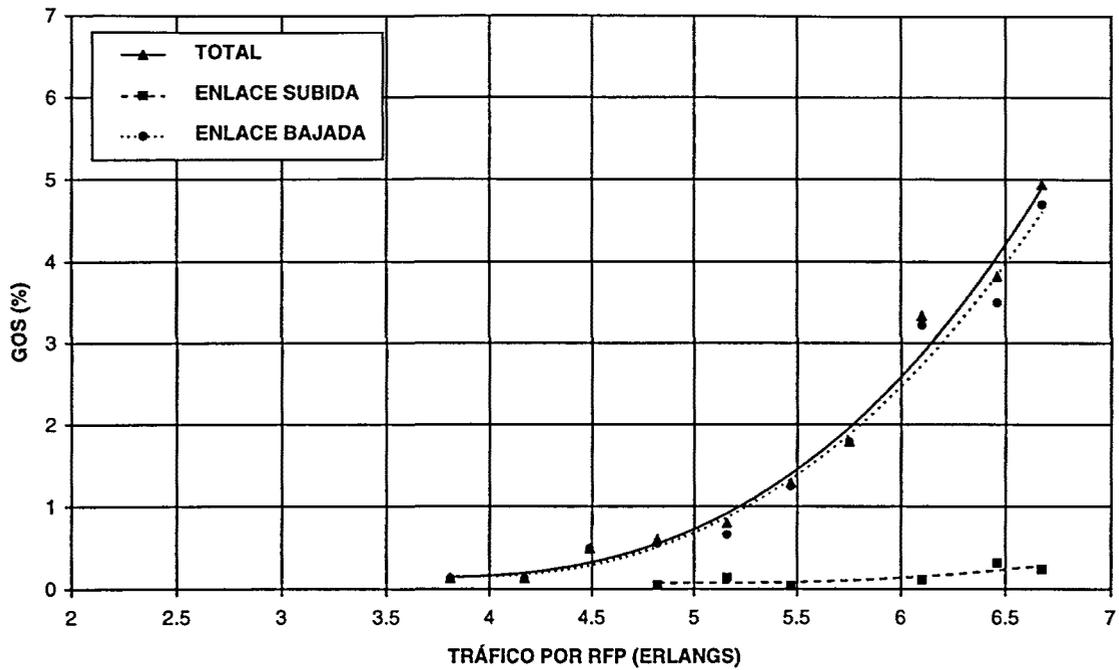


Figura 6.6.6 Análisis del comportamiento del sistema: Control de potencia en los dos enlaces y sensibilidades en las estaciones base de -83 dBm.

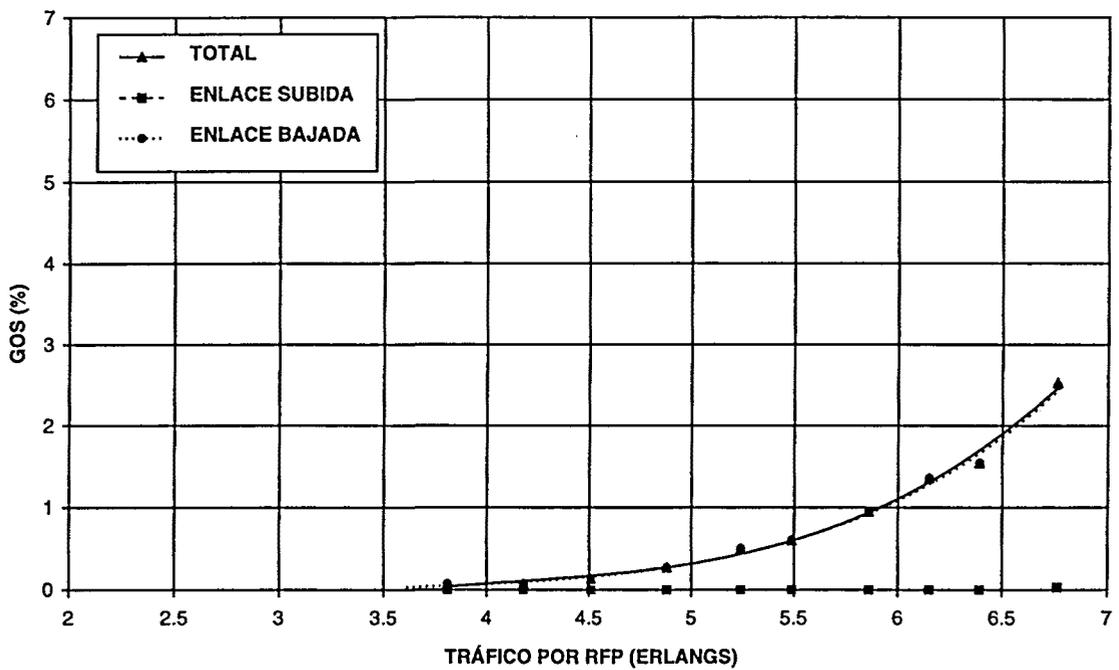


Figura 6.6.7 Análisis del comportamiento del sistema: Control de potencia en los dos enlaces y sensibilidades en las estaciones base de -90 dBm.

Llegados a este punto, tenemos el sistema saturado por la falta de canales en las estaciones base, para incrementar el tráfico cursado con la misma calidad es necesario disponer de más canales por RFP. Para ello es posible instalar más de un transceptor en cada estación base. En la figura 6.6.8 se puede comparar el comportamiento del sistema cuando se utiliza el control de potencia en ambos enlaces y estaciones base con receptores de -90 dBm, con 1 ó 2 transceptores y con un modelo sin control de potencia. Observamos como la ganancia en la capacidad del sistema es realmente importante; partiendo de los 3.5 Erlangs por RFP iniciales sin control de potencia, pasamos a 5.8 con control de potencia y 1 transceptor y llegamos a 12 Erlangs por RFP utilizando control de potencia y 2 transceptores. La capacidad final conseguida es 3.4 veces mayor que la inicial.

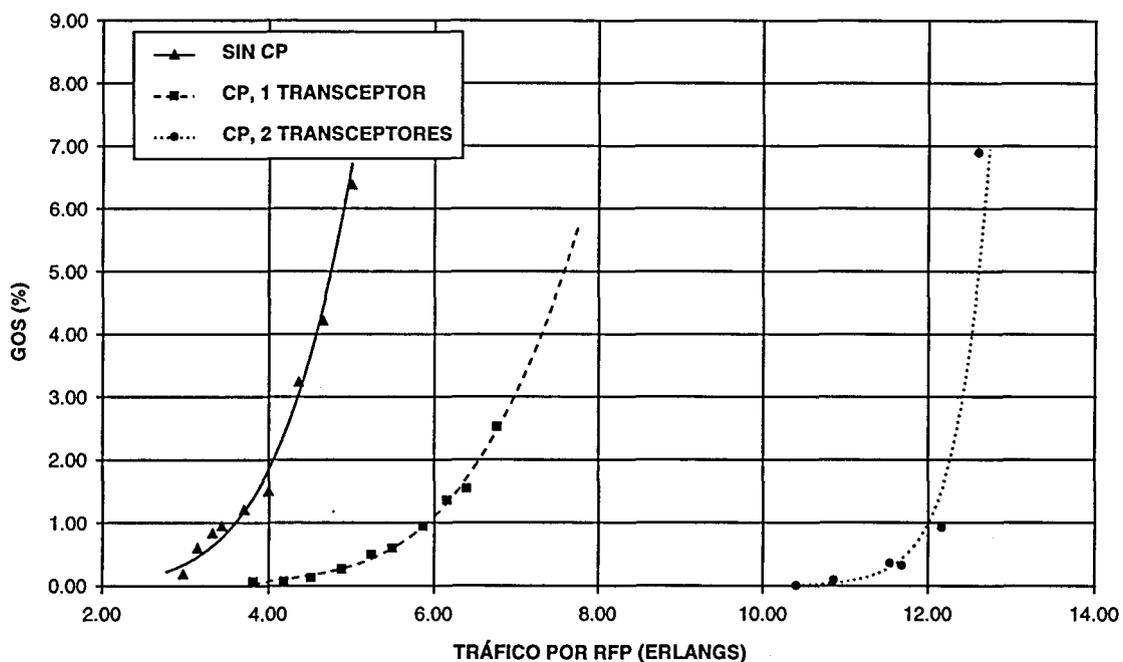


Figura 6.6.8 Sistema con control de potencia en los dos enlaces, sensibilidades en las estaciones base de -90 dBm y varios transceptores por RFP.

6.6.1.3 Conclusiones

La utilización del DECT en exteriores requiere de mecanismos de control de interferencia para no tener capacidades muy bajas. La utilización de antenas directivas mejora la capacidad del sistema respecto a la utilización de antenas omnidireccionales pero todavía no es suficiente.

El DECT al estar diseñado para trabajar en interiores no requería de mecanismos de control de interferencias con lo que no se definieron en el estándar. Al trabajar en exteriores resulta posible su implementación. En este apartado se ha evaluado el

comportamiento del sistema RLL con control de potencia, estudiándose dos mecanismos. El primero no requiere de ninguna modificación del estándar y consiste en definir dos áreas de transmisión de potencia, en la más cercana a la estación base los equipos transmiten 80 mW y en la más lejana 250 mW. No obstante este mecanismo ofrece unos resultados muy pobres con lo que no resulta eficiente su utilización. El otro mecanismo de control de potencia considerado controla la potencia transmitida en base a la relación C/I recibida en el otro extremo, intentando que todos los receptores consigan una relación C/I determinada. Con este método las ganancias son realmente significativas consiguiéndose un rango de incrementos que van desde el 34 % al 240 %, utilizando control de potencia en 1 ó 2 enlaces, estaciones base con receptores de sensibilidad -83 dBm o -90 dBm y 1 ó 2 transceptores.

6.6.2 ACCESO A VARIAS ESTACIONES BASE

El estándar DECT prevé la opción de que cuando un terminal no consigue acceder a la estación base de la cual recibe un mayor nivel de potencia intente acceder a otras. Para ello construye una lista de estaciones base, ordenándolas según su potencia recibida, e intenta acceder a ellas de forma secuencial.

Para poder comparar el comportamiento del sistema accediendo a dos estaciones base en lugar de una como hasta ahora, se ha considerado que el número máximo de intentos para acceder a un canal tiene que ser el mismo, es decir 10. El algoritmo utilizado para cambiar de estación base es muy simple: se realizan un número determinado de intentos a la primera estación base, si no se consigue acceder, se intenta la segunda estación base hasta el máximo de 10 intentos en total.

En sistemas celulares con terminales móviles que disponen de antenas omnidireccionales, el diagrama de radiación de las mismas no influye a la hora de acceder a una segunda estación base. En sistemas RLL, lo más usual es disponer de antenas directivas en los terminales ya que se ha visto que mejoran en gran medida la capacidad del sistema. Estas antenas aumentan la calidad del enlace pero, a su vez limitan el número de estaciones base de segunda opción a las que el terminal puede conectarse ya que siempre están orientadas hacia la mejor estación base.

En sistemas de bucle de abonado vía radio, aprovechando que los terminales son fijos, pueden instalarse con bastante facilidad antenas que sean capaces de reapuntarse a la estación base de segunda opción cuando sea preciso. Debido a que estación base de segunda opción será siempre la misma para un determinado abonado, éste puede disponer de un array adaptativo de dos posiciones, y que sea capaz de cargar unos u otros coeficientes almacenados en memoria, apuntando el haz en la dirección requerida. Otra opción es disponer de dos antenas directivas apuntado a la primera y segunda estación base respectivamente, con un conmutador que active una u otra según sea necesario.

En la figura 6.6.9 observamos el comportamiento del sistema descrito con equipos radio de antenas de 120° y 36 canales disponibles. El acceso a una segunda estación base sin tener la opción del reapuntamiento no resulta eficiente. Esta conducta es debida a que el acceso a una estación base, no se realiza generalmente por la dirección principal del diagrama de radiación de la antena y la distancia entre transmisor y receptor suele ser mayor que en la primera. Estas condiciones comportan una potencia recibida baja y una relación C/I al límite del umbral. Para tráficos bajos, donde los trasposos ocurren muy raras veces, el poder acceder a un canal, aunque sea a costa de una baja C/I, reduce la probabilidad de bloqueo y en consecuencia el GOS. Para tráficos altos el sistema estará más interferido y las llamadas con baja calidad serán las primeras en interrumpirse. En este caso la ponderación por 10 de las llamadas interrumpidas pesa más que las llamadas que puedan no bloquearse, y aunque la probabilidad de bloqueo siga siendo baja la de interrupción crece perjudicando al GOS. En estas circunstancias es mejor bloquear una llamada con una relación C/I baja que no dejarla cursar y que tenga que interrumpirse más adelante.

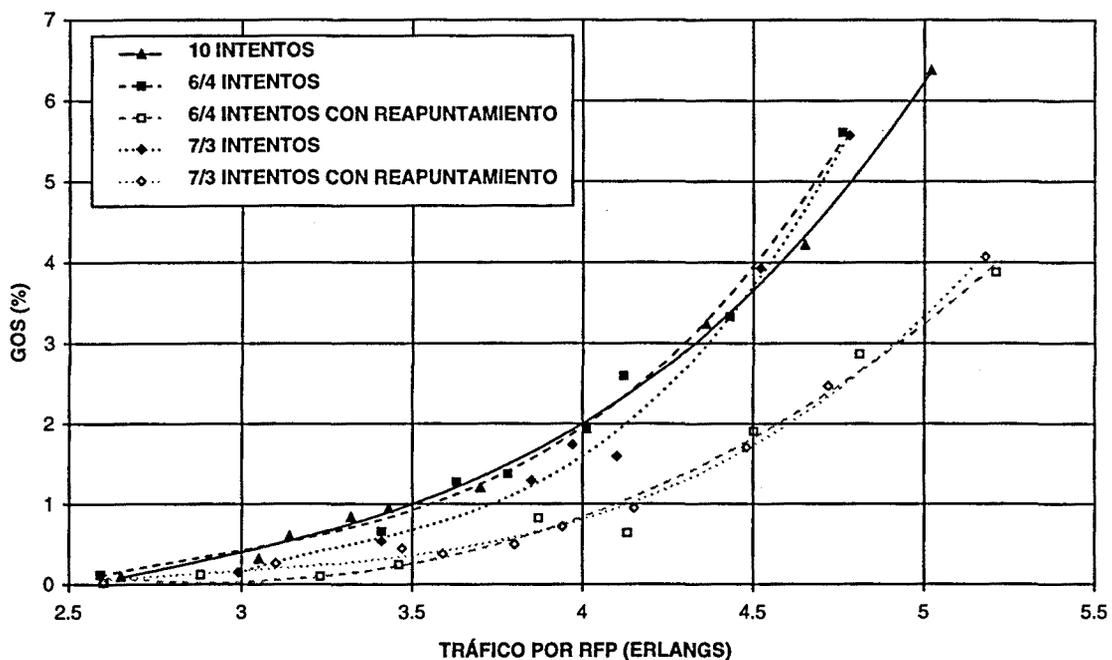


Figura 6.6.9 Capacidad del sistema accediendo a una segunda estación base con y sin reapuntamiento.

La elección de más intentos en la primera o segunda estación base determina por muy poco margen la capacidad del sistema. En la figura 6.6.9 se observa que el tomar 6 intentos en la primera y 4 en la segunda o 7 y 3 sólo afecta mínimamente los resultados de un sistema sin reapuntamiento. En el primer caso se consigue exactamente la misma capacidad que en un sistema sin acceso a la segunda estación base para un GOS del 1 %, 3.5 Erlangs por RFP. Para el segundo caso el acceso a la segunda estación base se hace más restrictivo y se consigue un incremento del 6 % respecto al caso original. Para

tráficos altos los dos casos se comportan igual perjudicando al sistema [CAS3]. Cabe mencionar que se han simulado otras configuraciones de intentos resultando en un peor comportamiento.

A diferencia de los resultados anteriores, si se permite reapuntamiento en los terminales, sí que se obtiene una ganancia significativa. El sistema pasa de los 3.5 Erlangs por RFP originales a 4.1 Erlangs, lo que representa un incremento del 17 %. Con reapuntamiento el sistema se comporta de la misma forma si se realizan 6 intentos sobre la primera estación base y 4 sobre la segunda que 7 y 3.

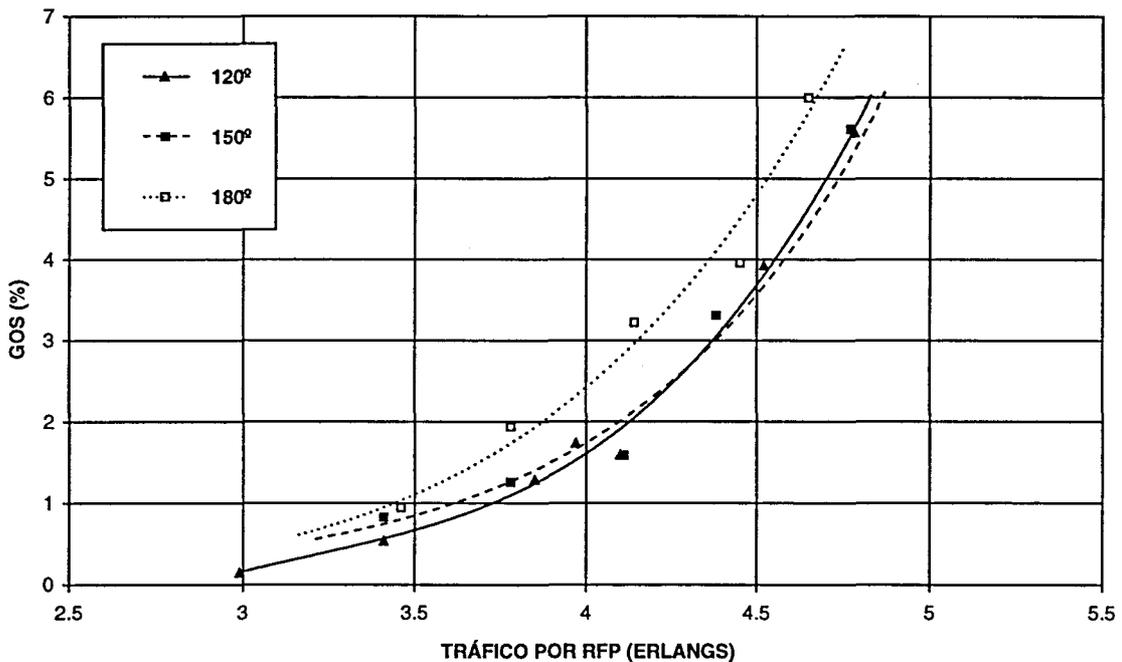


Figura 6.6.10 Capacidad del sistema accediendo a una segunda estación base con 7 intentos en la primera y dos en la segunda, sin reapuntamiento y con diferentes diagramas de radiación de antenas de estación base; antenas del terminal de 120°.

El acceso a una segunda estación base se debe normalmente a que la primera no tiene ningún slot disponible, o bien porque aquellos canales que resultan menos interferidos en el terminal requieren de un slot que ya está ocupado en la estación base. La mejor estación base es habitualmente la más cercana al terminal, y está situada en un emplazamiento de estaciones base compartido con otras estaciones base apuntando hacia otros sectores. Cuando se debe acceder a una segunda estación, no puede hacerse a una de las que están en el mismo emplazamiento que la primera porque existe una gran atenuación en su dirección debida al diagrama de antena. Debe buscarse, en este caso, otra estación base más alejada que la primera y por consiguiente se recibe con menor potencia. Considerando estas circunstancias resulta interesante estudiar un sistema que facilite el acceso a una segunda estación base situada en el mismo emplazamiento que la primera.

Para ello se ha simulado un escenario similar al anterior, con emplazamientos de 3 estaciones base apuntando en direcciones separadas 120° , pero en este caso el diagrama de radiación es más ancho, con lo que se obtienen zonas cubiertas por dos estaciones base. El diagrama de radiación de los terminales continua siendo de 120° y se supone que no requieren reapuntamiento ya que las dos estaciones base se encuentran en mismo emplazamiento.

La figura 6.6.10 presenta los resultados de un sistema con acceso a dos estaciones base de 7 intentos sobre la primera y 3 sobre la segunda, sin reapuntamiento, 3 portadoras, diagramas de radiación en los terminales de 120° y en las estaciones base de diversos haces. Se observa como el solape de antenas no resulta ventajoso para el sistema. El hecho de poder acceder como segunda opción a estaciones base situadas en el mismo emplazamiento que en la primera estación base, no compensa el efecto perjudicial del aumento de interferencias provocado por el ensanchamiento del haz de antena. El sistema resultante se comporta incluso peor que el original, soportando tráficos ligeramente inferiores.

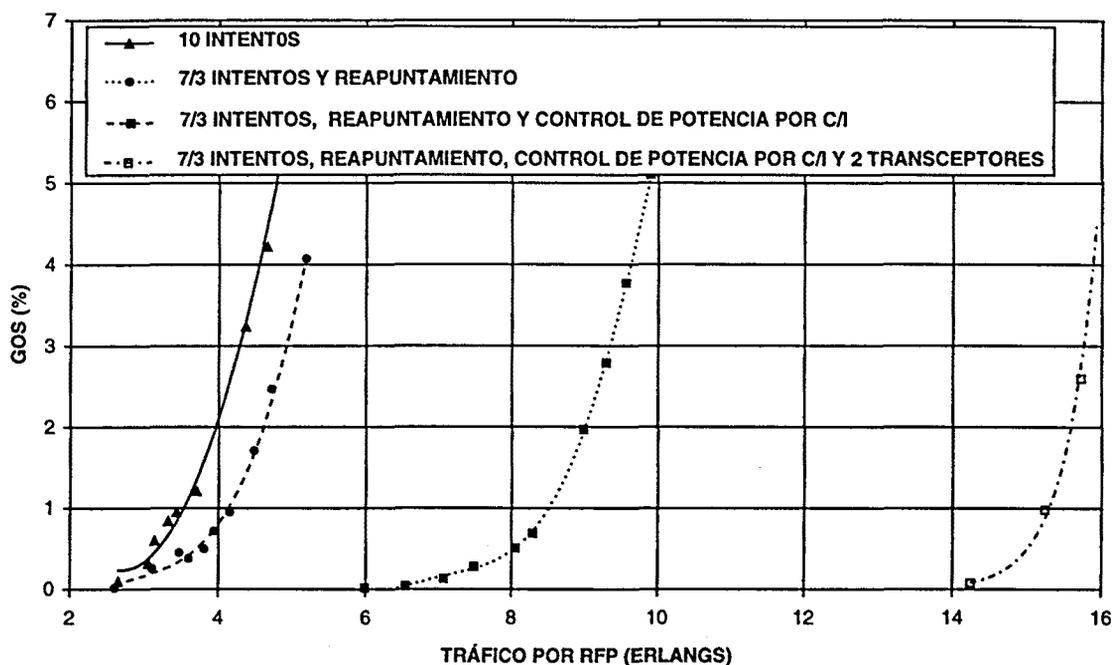


Figura 6.6.11 Capacidad del sistema accediendo a una segunda estación base, con control de potencia basado en la relación C/I en ambos extremos y sensibilidades en estación base de -90 dBm y en terminal de -83 dBm.

El acceso a una segunda estación base permite acceder al sistema llamadas que de otra forma serían bloqueadas o interrumpidas por la falta de slots disponibles en la primera estación base. Sin embargo, este procedimiento no disminuye la interferencia global del sistema. A continuación se ha evaluado un sistema que incorpora el mecanismo de acceso a una segunda estación base para mejorar llamadas no cursadas

por motivos de capacidad, y un mecanismo de control de potencia para mejorar la interferencia global del sistema.

En la figura 6.6.11 se observa la capacidad del sistema descrito con acceso a dos estaciones base y control de potencia por C/I en ambos enlaces y sensibilidades de -90 dBm en la estación base y -83 dBm en el terminal. Los haces de todas las antenas son de 120° y se utilizan 3 portadoras. En este caso la ganancia de tráfico cursado es realmente espectacular ya que se pasa de los 3.5 Erlangs por RFP sin ningún mecanismo, a 3.75 Erlangs con acceso a dos estaciones base, se aumenta hasta 8.5 Erlangs añadiendo el control de potencia y se llega a 15.2 Erlangs instalando dos transceptores por RFP. Con un sólo transceptor la capacidad final es el 242 % de la inicial y para dos transceptores el 434 %, llegando con este caso a la limitación del sistema por interferencias.

La tabla 6.6.1 resume los resultados obtenidos hasta el momento, con los mecanismos de control de potencia basado en la relación C/I en los dos enlaces y sensibilidades de estaciones base de -90 dBm, y acceso a dos estaciones base con reapuntamiento.

	Sistema Original	2 EB-reap	CP, 1 Trans.	CP, 2 Trans.	2 EB-reap., CP, 1 Trans.	2 EB-reap., CP, 2 Trans.
Tráfico cursado por RFP para un GOS del 1 % (Erlangs)	3.5	4.1	5.8	12	8.5	15.2

Tabla 6.6.1 Capacidades de los diferentes sistemas evaluados.

El caso de acceso a dos estaciones base con reapuntamiento y control de potencia utilizando 1 sólo transceptor refleja un resultado un tanto inesperado. Al ser posible el acceso a dos estaciones base, el terminal puede acceder a 24 canales en total, 12 en la primera estación y 12 en la segunda. De esta forma, si se considera que la segunda estación base también desborda sus llamadas de primera opción sobre la primera estación base, entre las dos y según la fórmula de Erlang-B pueden cursar 15 Erlangs, o bien 7.5 Erlangs cada una de ellas. En nuestro sistema obtenemos 8.5 Erlangs por estación base.

El tráfico desbordado de una estación base y que es ofrecido a la otra aparece a ráfagas con lo cual no puede considerarse de Poisson. Nuestro escenario de sistema RLL tiene unas características un tanto diferentes ya que las llamadas desbordadas por una estación base no se redireccionan siempre a la misma estación base de segunda opción. La segunda estación base es escogida según su nivel de potencia, por lo que existen dos parámetros que influyen en esta elección: la distancia del terminal a la segunda estación base y el factor de sombras. La posición del terminal determina que las estaciones base con más probabilidad de ser escogidas como segunda opción sean cualquiera de las seis

vecinas de la primera y con igual probabilidad. El factor de sombras permite en determinadas ocasiones incluso sea una estación más lejana a las 6 vecinas.

En estas circunstancias, el tráfico desbordado que recibe una estación base es la suma de parte de los tráficos desbordados de las restantes estaciones base con lo que no se comporta tanto a ráfagas sino que es más aleatorio. Para evaluar el tráfico cursado por diferentes grupos de circuitos que se desbordan el tráfico bloqueado entre ellos, se ha modificado el simulador para que opere sin pérdidas de propagación y sin interferencias. Una llamada es aceptada siempre que exista un canal disponible, en caso contrario se escoge al azar otra estación base del sistema y se ofrece a ésta. De esta forma sólo se pierden llamadas por falta de capacidad.

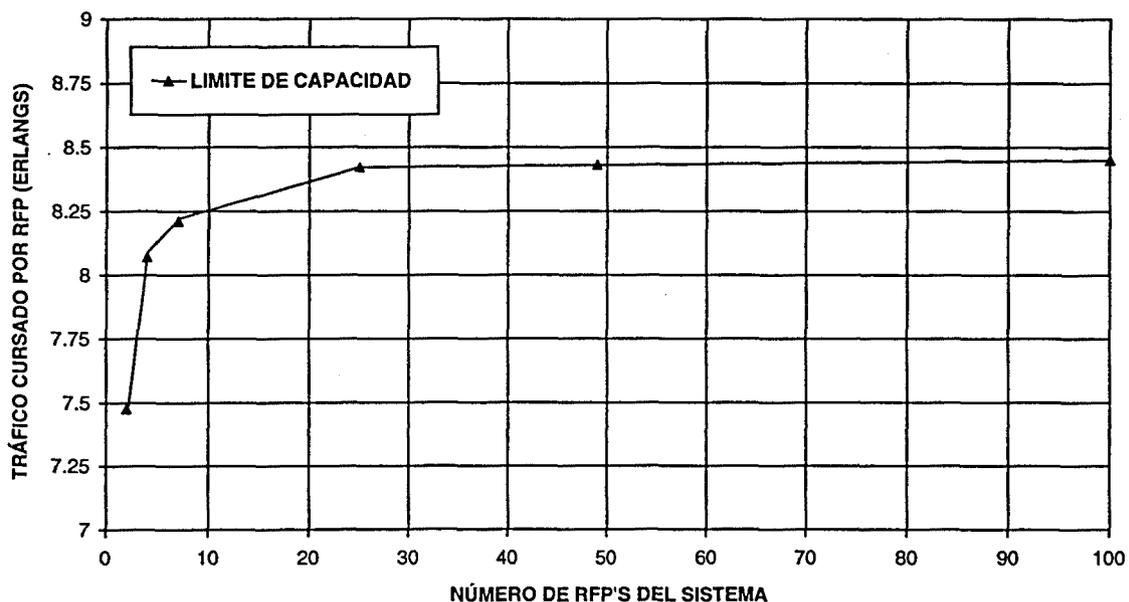


Figura 6.6.12 Capacidad de un sistema ideal, sin interferencias ni pérdidas de propagación, donde las llamadas bloqueadas se desbordan a una segunda estación base elegida al azar entre todas las del sistema.

En la figura 6.6.12 se observa el tráfico cursado para una probabilidad de bloqueo del 1 % y para sistemas con diferente número de estaciones base. Para un sistema de dos estaciones base el tráfico cursado es de 7.5 Erlangs por RFP como era de esperar, pero a medida que el número de estaciones base aumenta también lo hace su capacidad. Para 4 estaciones base se obtienen 8.1 Erlangs, para 7 estaciones 8.2 Erlangs y a partir de 25 estaciones base, el tráfico cursado ya está cercano a los 8.5 Erlangs.

El límite de los 8.5 Erlangs se obtiene analíticamente aplicando de forma consecutiva dos veces la fórmula de Erlang-B, como si el tráfico desbordado fuera también de Poisson.

Para obtener una probabilidad de bloqueo final del 1 % y considerando que las dos estaciones base a las que puede acceder el terminal se comportan igual, cada estación base debe tener una probabilidad de bloqueo del 10 %. Para 12 canales y unas pérdidas del 10 % el tráfico ofrecido es de 9.5 Erlangs, con lo que el tráfico cursado es el 10 % menor, es decir 8.55 Erlangs.

En el sistema RLL estudiado, aplicando control de potencia y acceso a una segunda estación base con reapuntamiento, el tráfico cursado por estación base es de 8.5 Erlangs y está limitado por capacidad. Podemos decir que en este caso el tráfico ofrecido a una estación base debido al desbordamiento de otras estaciones base se comporta de forma similar a un tráfico de Poisson y es posible aplicar dos veces consecutivas la fórmula de Erlang-B para obtener su resultado analítico.

Como conclusión puede decirse que el acceso a una segunda estación base, mecanismo contemplado en el estándar, no mejora significativamente el comportamiento de un sistema de bucle de abonado vía radio como el descrito en nuestro estudio. Si el terminal de usuario permite reapuntar su antena hacia la primera o segunda estación base según convenga, el enlace se hace más robusto a las interferencias y la capacidad del sistema aumenta en un 17 %. Sin embargo cuando se obtienen las mayores ganancias es al combinar el acceso a una segunda estación base con un sistema que tenga control de potencia.

6.6.3 INFORMACIÓN DE ESTACIÓN BASE

El estándar DECT especifica que sea el terminal quien escoja el canal para la conversación. Para ello el terminal construye una lista con los mejores canales desde su posición, y cuando desea iniciar una conversación intenta acceder al sistema con el primer canal de la lista que es el menos interferido, aunque no tiene porque ser así para la estación base. Si este canal no es adecuado para la estación base se repite el proceso con el siguiente de la lista, hasta un número máximo de intentos.

El problema que presenta este procedimiento es que en una gran parte de las conexiones, los dos enlaces están muy desbalanceados en relación a su nivel de C/I, es decir, se da el caso de que tenemos un canal muy bueno, normalmente el de bajada, y otro regular. Para mantener la conexión se necesita que los dos enlaces superen simultáneamente un mínimo de relación C/I por lo que resultaría mejor tener los dos canales a un nivel intermedio que uno muy alto y el otro cerca del umbral. Para poder escoger un canal con estas características sería necesario que tener información de las interferencias recibidas por un canal en los dos sentidos. Otro problema que surge es que al disponer de un número limitado de intentos de acceso puede darse el caso de que exista algún canal con la suficiente calidad en los dos sentidos pero que no se encuentre entre las primeras posiciones de la lista del terminal. Ello comporta que una llamada que hubiera podido establecerse por la existencia de este canal, se deseche al tener primero

en la lista un número de canales de poca calidad superior al número permitido de intentos.

En este apartado se estudia el caso en el cual la estación base informa al terminal del estado de sus canales, algoritmo propuesto para un sistema DCA en [CHU1]. Es decir, la estación base también construye una lista con sus mejores canales y la transmite al terminal, éste construye una nueva lista con los canales óptimos para la conexión con toda información de que dispone.

El siguiente problema que se nos presenta es el algoritmo utilizado para ordenar de forma óptima los canales. El mejor método consiste en ordenar los canales según su nivel de interferencia (RSSI: *Received Signal Strength Indicator*), pero del enlace más perjudicado, independientemente de si se trata del de subida o de bajada. Para realizar las simulaciones se ha empleado esta técnica. Se han evaluado otros algoritmos de ordenación pero su utilización resulta en una pérdida de capacidad.

Nótese que este procedimiento de transmisión del estado de las estaciones base no reduce interferencias en el sistema, sino que optimiza el mecanismo de acceso y evita interrupciones haciendo que las comunicaciones sean más robustas. Esta mayor robustez se consigue disminuyendo la calidad media de los mejores enlaces pero aumentando la de los peores. Asimismo, también disminuye el tiempo de acceso al nuevo canal, ya que el terminal sabe de antemano aquellos canales que superan el umbral de calidad en la estación base y sólo tiene que realizar un intento.

Para estudiar el comportamiento del sistema con este nuevo método de acceso se ha simulado un escenario con 3 estaciones base de 120° en cada emplazamiento de estaciones base. En este caso se ha tomado el modelo de propagación más restrictivo que considera que el factor de sombras desde un terminal a todas las estaciones base es el mismo.

En la figura 6.6.13 se observa que cuando se utilizan 3 de las 10 portadoras de que dispone el DECT la capacidad del sistema aumenta de 1.4 Erlangs por RFP sin información a 1.75 Erlangs con información, lo que representa un incremento del 20 % respecto al primer sistema. A pesar de que esta ganancia ya es bastante significativa no se puede aumentar porque el sistema se encuentra totalmente limitado por interferencias.

Se ha comentado anteriormente que uno de los puntos fuertes que tiene este mecanismo es evitar que se pierdan llamadas porque los canales que las pueden cursar no se encuentran entre los posibles intentos. Cuando un sistema utiliza 36 canales y para establecer una llamada puede intentar 10, ya está cubriendo un 28 % de las posibilidades. Con esto se quiere hacer notar que cuantos más canales tenga el sistema, con el mismo número de intentos, la relación de los que puede intentar es menor. Por lo tanto, cuando se utilice todo el espectro, 120 canales, la información de estación base puede llegar a ser más eficiente.

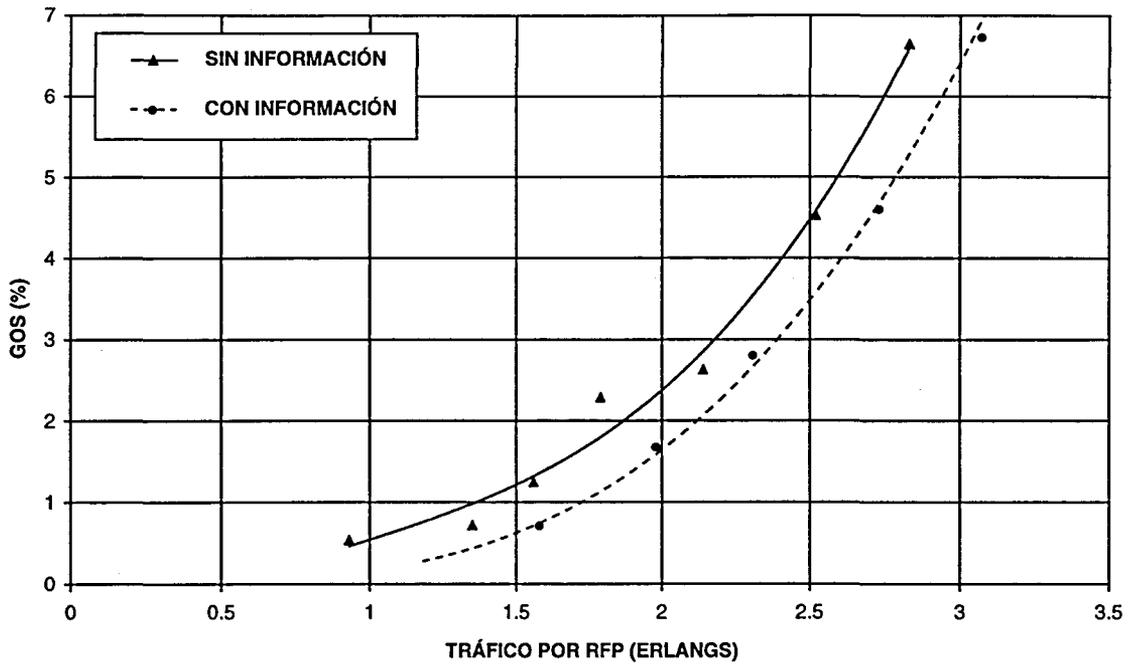


Figura 6.6.13 Sistema de RLL donde la estación base emite información de los mejores canales desde su posición, 3 portadoras y asignación de factor de sombras igual desde un terminal a todas las estaciones base.

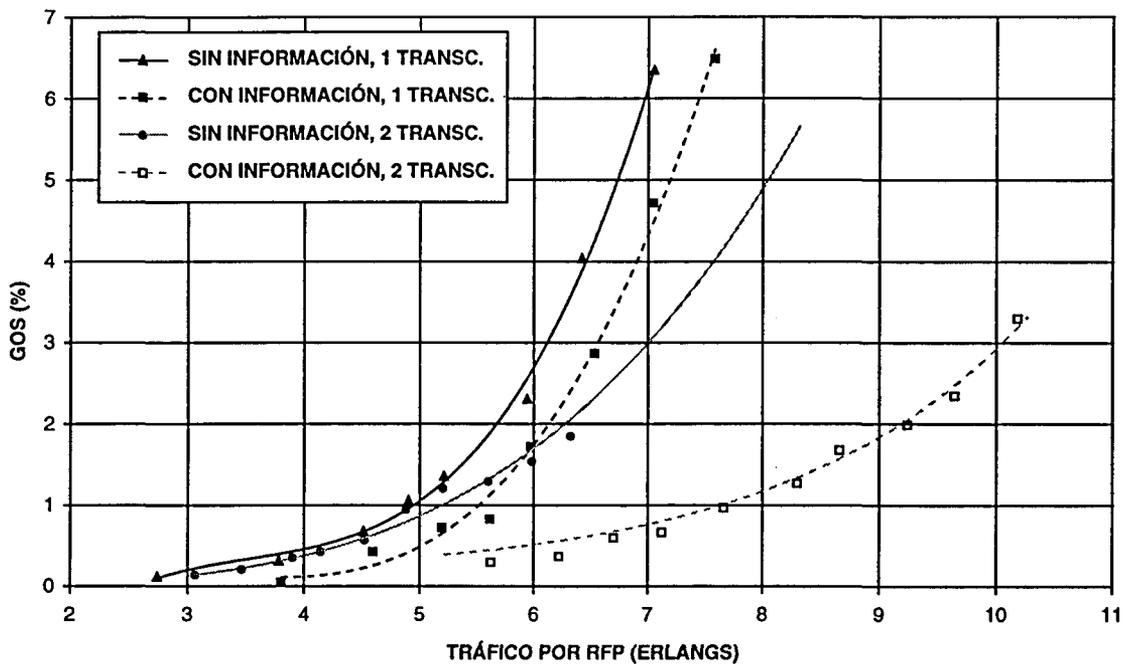


Figura 6.6.14 Sistema de RLL donde la estación base emite información de los mejores canales desde su posición, 10 portadoras y asignación de factor de sombras igual desde un terminal a todas las estaciones base.

Se ha evaluado el mismo sistema pero utilizando en este caso los 120 canales de que dispone el DECT. La figura 6.6.14 presenta los resultados obtenidos. Cuando se tiene un solo transceptor por estación base en un sistema convencional, se cursan 5 Erlangs por RFP, lo que significa que el sistema está llegando al límite de capacidad. Cuando se aplica la información de estaciones base la calidad de los usuarios mejora y el sistema llega a dicho límite. Para poder ver el efecto que realmente tiene con este número de canales es preciso utilizar dos transceptores por estación base.

Al instalar dos transceptores por RFP en un sistema convencional, cada estación base puede cursar más tráfico, llegando a los 5.1 Erlangs por transceptor o 10.2 por estación base. Ahora el sistema está limitado por interferencias ya que con los 24 canales que proporcionan los dos transceptores es posible llegar a los 15.2 Erlangs.

En este caso sí que resulta muy interesante poder ordenar los canales de la mejor forma ya que 10 intentos sobre 120 canales tan solo representan el 8 %. Cuando se permite disponer de información de estación base se consigue una ganancia importante pasándose de los citados 5.1 Erlangs por estación base a 7.6 Erlangs, lo que representa un incremento del 49 %. En estas circunstancias el sistema vuelve a estar limitado por capacidad.

6.6.4 ARRAYS ADAPTATIVOS

Llegados a este punto ya transmitimos con la mínima potencia aplicando el control de la misma, escogemos el mejor canal para los dos enlaces disponiendo de la información de estación base y hemos llegado al límite razonable en cuanto a la directividad de antena con haces de 60°. No podemos avanzar si no encontramos otros sistemas de limitación de interferencias. En el siguiente estudio proponemos la utilización de arrays adaptativos en la estación base.

En los sistemas de antenas tradicionales, se requiere una dispersión de la potencia emitida por la estación base en una amplia área porque se desconoce la posición del usuario. Estos diagramas de antena anchos, además de dispersar la potencia en direcciones innecesarias, también permiten la entrada en recepción de un alto número de interferencias. Por el contrario, las antenas inteligentes determinan la localización del usuario e intentan emitir y recibir energía sólo en la dirección deseada.

Los fabricantes de equipos de comunicaciones sin hilos están desarrollando antenas inteligentes según dos modelos: las denominadas de conmutación de haz (*switched beam*) y los arrays adaptativos [NOW].

Las primeras son una extensión del método actual de sectorización celular, en el cual un emplazamiento de estaciones base típico tiene tres sectores de 120°. La técnica de conmutación de haz subdivide estos macrosectores de 120° en otros que

denominamos microsectores. Cada microsector contiene una antena con un haz fijo mucho más directivo que la antena original del macrosector. Cuando un usuario móvil entra en un macrosector, la antena de conmutación de haz selecciona el microsector que recibe la señal con más potencia y lo utiliza para la comunicación. Durante toda la llamada, el sistema monitoriza la potencia de señal recibida en cada microsector fijo y va conmutando cuando es necesario. Las principales limitaciones de este sistema son que los haces son fijos y cuando el usuario se mueve su potencia varía debido a que la señal no entra por el máximo del haz. Además, si el terminal se acerca a la frontera del haz su calidad puede decrementarse muy rápidamente antes de ser conmutado a otro microsector. Otra limitación ocurre porque el sistema no es capaz de distinguir entre la señal deseada y otras interferentes. Si la señal interferente se encuentra aproximadamente en el centro del haz y la deseada en un extremo la primera tiene mucha más ganancia y la calidad del usuario baja.

Los arrays adaptativos se basan en otro concepto: ajustan la dirección del haz para maximizar la potencia recibida por un terminal que se mueve. Esta técnica adaptativa requiere de sofisticados algoritmos de procesamiento de señal para identificar continuamente la señal deseada, los efectos multicamino y las interferencias, y calcular a la vez su dirección de llegada. Una vez se consigue esta información se actualiza continuamente el haz para dirigir el lóbulo principal hacia el abonado deseado y los nulos del diagrama de radiación hacia las señales interferentes. A diferencia del sistema de conmutación de haz, esta técnica siempre dirige el máximo hacia el usuario correcto y a la vez discrimina las interferencias.

Este concepto de células más inteligentes que utilizan múltiples antenas y complejos algoritmos de procesamiento de señal [KEN] lleva estudiándose durante varios años aplicados a distintos sistemas móviles: NMT [AND], GSM [FOR1], [WEL] o sistemas TDMA en general [TSO1], [TSO2], [HO], [FOR2], pero su coste los hace inviables para aplicaciones de comunicaciones móviles comerciales. Actualmente, el descenso del coste de los equipos los hace más prácticos aunque todavía existen limitaciones tecnológicas para el seguimiento de los terminales con movilidad. En un sistema RLL esta complejidad tecnológica no es prohibitiva en manera alguna ya que la estación base puede conocer la localización geográfica del abonado. El sistema requiere que entre los datos administrativos del abonado estén también los coeficientes de desfase de los diferentes componentes del array adaptativo, que se cargarán en cada tiempo de slot cuando el usuario esté en conexión.

En nuestro estudio se han simulado antenas de arrays adaptativos que son capaces de dirigir el lóbulo principal hacia el usuario deseado en cada tiempo de slot, suponiendo que ya se dispone de antemano de la información necesaria para realizar el apuntamiento. No se ha permitido situar nulos del diagrama de radiación en las direcciones de las interferencias ya que no es posible conocerlas previamente y en este caso sí que el precio de los equipos se incrementaría.

En las figuras siguientes se presentan los resultados para un sistema de bucle de abonado vía radio similar al estudiado en los apartados anteriores. Suponemos que estamos compartiendo el espectro con otros operadores por lo que sólo disponemos de 3 de las 10 frecuencias que tiene asignadas el DECT. En las estaciones base instalamos arrays adaptativos y en los terminales antenas directivas apuntadas hacia su mejor estación base. En los casos anteriores donde disponíamos de antenas de 120° , cada estación base cubría un sector de 120° y para cubrir una célula hexagonal, en el emplazamiento de estaciones base se requerían 3 estaciones base. Ahora, con arrays adaptativos, independientemente del ancho del haz, se tiene una sola estación base que da cobertura a toda la célula hexagonal apuntando su diagrama de radiación hacia cualquier dirección. Si se dispone de más transceptores, cada uno de ellos será independiente de los otros y podrá apuntar su haz en la dirección que crea oportuno. Para poder comparar los dos casos, un sistema con arrays adaptativos tendría que disponer de tres transceptores por célula o estación base.

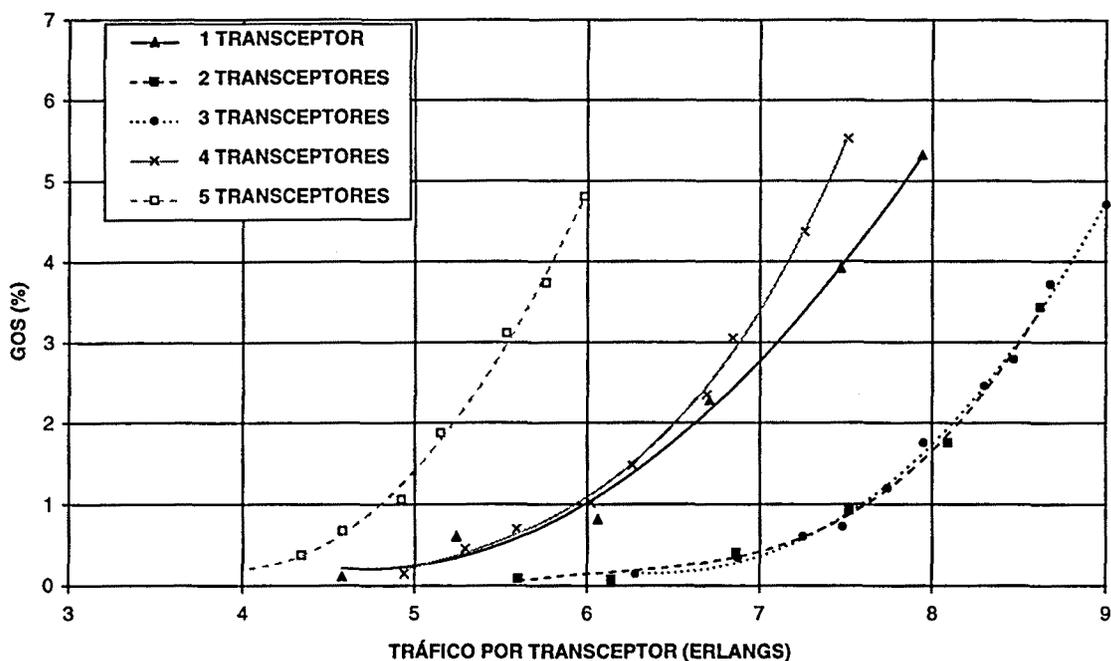


Figura 6.6.15 Capacidad por transceptor de un sistema con arrays adaptativos de 120° en las estaciones base, antenas directivas de 120° en los terminales y 3 portadoras.

En las figuras 6.6.15 y 6.6.16 tenemos la capacidad por transceptor y estación base respectivamente para un sistema con todas las antenas de 120° . Observamos que para uno y dos transceptores el sistema está limitado por la falta de canales ya que se llega a 5.8 Erlangs por transceptor en el primer caso y a 7.5 en el segundo. A partir de este momento si instalamos más transceptores tenemos el sistema limitado por interferencias. Este razonamiento puede contrastarse en la figura 6.6.16 donde vemos que el tráfico por RFP se incrementa hasta tres transceptores, a partir de este momento el sistema no gana capacidad aunque se instalen más transceptores.

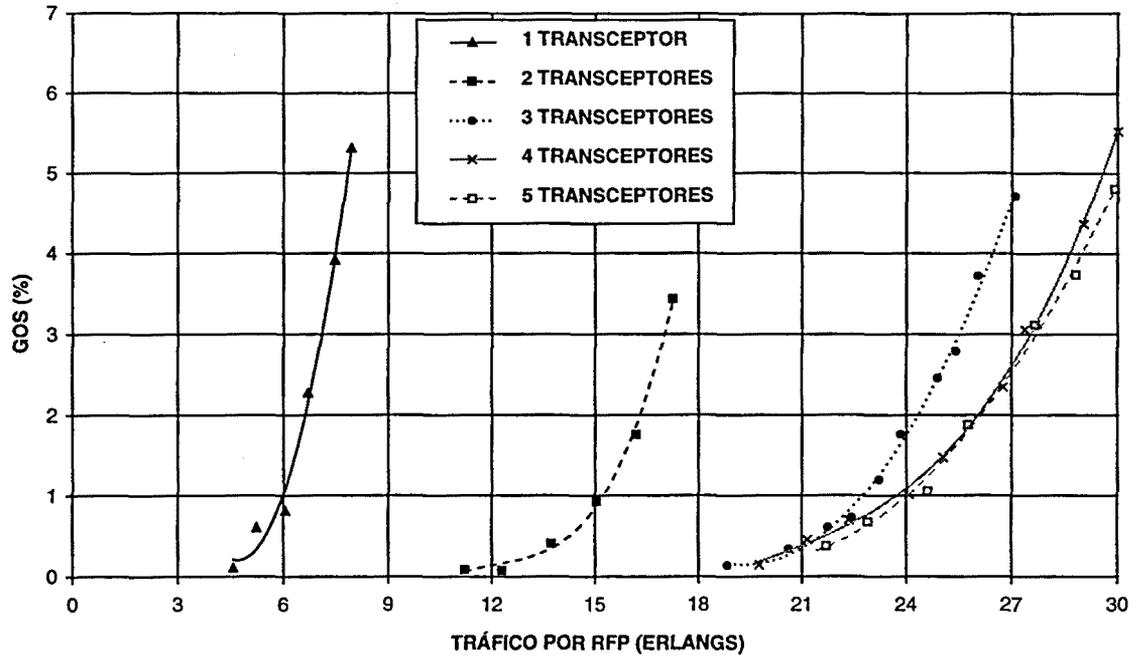


Figura 6.6.16 Capacidad por RFP de un sistema con arrays adaptativos de 120° en las estaciones base, antenas directivas de 120° en los terminales y 3 portadoras.

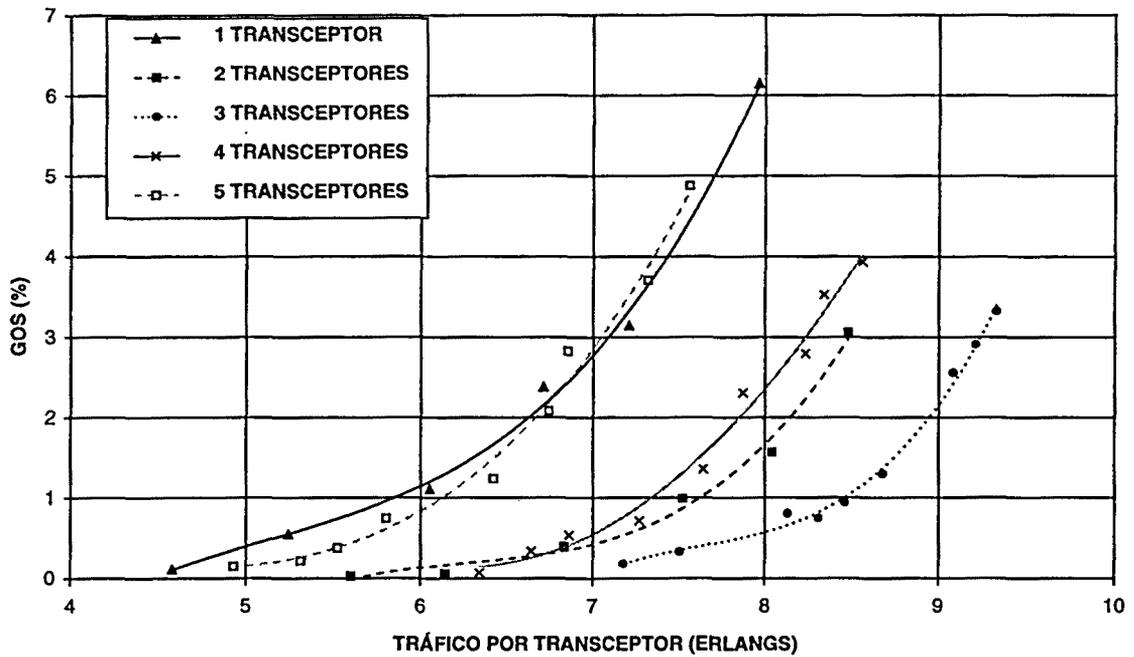


Figura 6.6.17 Capacidad por transceptor de un sistema con arrays adaptativos de 60° en las estaciones base, antenas directivas de 60° en los terminales y 3 portadoras.

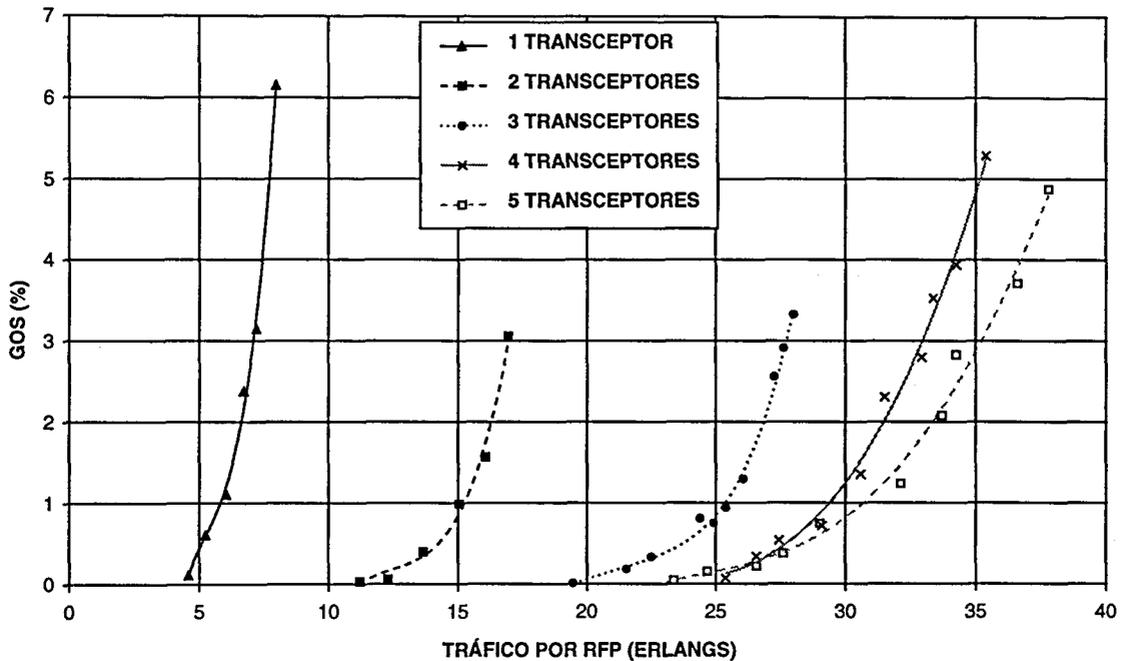


Figura 6.6.18 Capacidad por RFP de un sistema con arrays adaptativos de 60° en las estaciones base, antenas directivas de 60° en los terminales y 3 portadoras.

En las figuras 6.6.17 y 6.6.18 se tiene el mismo sistema anterior pero las antenas son de 60° en lugar de 120° . Vemos que el comportamiento, en líneas generales, es el mismo sin embargo, en este caso, la limitación por interferencia se consigue con 4 transceptores por RFP.

	Antenas directivas con 3 sectores de 120°	1 array adaptativo de 120° con 3 transceptores	Antenas directivas con 6 sectores de 60°	1 array adaptativo de 60° con 5 transceptores
Tráfico por emplazamiento de estaciones base (Erlangs)	10.3	22.7	23	31

Tabla 6.6.2 Comparación entre sistemas de antenas directivas fijas y de arrays adaptativos.

En la tabla 6.6.2 se comparan los sistemas de arrays adaptativos con los sistemas estándares de estaciones base con antenas directivas fijas. Para el caso de antenas de 120° , usando arrays adaptativos se consigue más del doble de capacidad que para el

sistema de antenas fijas utilizando la misma cantidad de transceptores. Con antenas de 60° el incremento no es tan considerable aunque llega al 35 %, pero en este caso se necesitan menos recursos, sólo 5 transceptores frente a los 6 empleados en el caso de antenas fijas.

Con los resultados obtenidos podemos decir que aunque la utilización de antenas inteligentes pueda parecer poco económica, el impacto en el coste total del sistema resultará en ahorro debido al hecho de que serán necesarios menos emplazamientos de estaciones base.

6.6.5 CONCLUSIONES

En este apartado se ha evaluado la viabilidad del estándar DECT para ser utilizado como bucle de abonado vía radio. Para ello se ha dispuesto en un área geográfica cuadrada, una malla de estaciones base con distribución hexagonal. Los usuarios que pueden aparecer en cualquier punto representan abonados que desde sus casas realizan una llamada. El objetivo del estudio es analizar el tráfico que pueden cursar las estaciones base en estas condiciones.

Se han evaluado dos tipos de sistemas: aquellos que utilizan las 10 frecuencias de que dispone el DECT, y los que tienen que compartir el espectro. Para los sistemas que comparten el espectro se ha supuesto que disponen de 3 frecuencias.

El primer sistema evaluado consiste en la instalación de antenas omnidireccionales en todos los equipos radio. Se ha visto que cuando se utilizan 3 frecuencias el sistema está limitado por interferencias, cada estación base puede cursar 1.8 Erlangs. Al utilizar las 10 frecuencias el sistema está limitado por falta de canales en las estaciones base y cada una de ellas cursa 5.7 Erlangs.

Una forma de incrementar el tráfico es sectorizando las estaciones base. El siguiente modelo utiliza antenas directivas en las estaciones base y en los terminales, que al estar fijos pueden tener la antena orientada siempre hacia la mejor estación base. El incremento de capacidad conseguido es muy significativo. Los emplazamientos de estaciones base o *Cell sites* de tres estaciones base con antenas directivas de 120°, y terminales también con antenas de 120°, cursan 10 Erlangs para 3 frecuencias y de 17.4 Erlangs para 10 frecuencias. Si disponemos de antenas de 60° en ambos extremos y 6 estaciones base en cada emplazamiento, el tráfico cursado por emplazamiento se eleva a 23 Erlangs para 3 frecuencias y a 35 para 10 frecuencias. En ambos casos, con antenas de 120° y de 60°, el sistema está limitado por interferencias cuando se usan 3 frecuencias y por falta de canales cuando se usan 10.

Para poder cursar más tráfico cuando se dispone de 10 frecuencias, es preciso instalar más transceptores en las estaciones base. Para el sistema de antenas de 120°,

cuando instalamos 2 transceptores por estación base, cada emplazamiento llega a cursar 41.7 Erlangs y aún está limitado por falta de canales. Por ello instalamos un tercer transceptor y el sistema ya queda saturado por las interferencias cursando 46 Erlangs por emplazamiento.

A partir de este punto si se requiere más capacidad por estación base o emplazamiento de estaciones base, es preciso buscar métodos para controlar y reducir las interferencias. Una solución es estrechar aun más los diagramas de radiación e instalar más estaciones base en los emplazamientos, pero esta técnica tiene un límite tecnológico y físico. Un mecanismo para controlar interferencias, utilizado por otros sistemas como el GSM o los basados en CDMA, es el control de potencia. El DECT no lo incorpora en su estándar ya que en aplicaciones de interiores no ofrece mayores prestaciones sin embargo en entornos de exteriores resulta muy interesante.

Un primer método de control de potencia que no requiere ninguna modificación del estándar es dividir el radio de cobertura de la célula en dos regiones. Cuando el operador instale el terminal en casa del abonado ajustará la potencia de emisión a 80 mW o a 250 mW, de acuerdo en que región se encuentre el abonado. Este método ha resultado ineficaz porque a pesar de disminuir la interferencia global del sistema tiene dos regiones donde los terminales tienen baja calidad.

El segundo método de control de potencia consiste en regular la potencia transmitida de acuerdo con la relación C/I recibida en el otro extremo. Este mecanismo sí que resulta eficiente, pasando, para un sistema de 3 frecuencias y antenas de 120° en todos los equipos radio, de 10 Erlangs por emplazamiento de estaciones base sin control de potencia a 17.4 con control de potencia. El sistema antes limitado por interferencia ahora lo está por capacidad. Como consecuencia instalamos un segundo transceptor en las estaciones base y llegamos a un tráfico cursado por emplazamiento de 36 Erlangs, quedando limitados por interferencias.

El estándar DECT permite que si un terminal no puede acceder a la mejor estación base porque tiene todos sus recursos ocupados, pueda intentar el acceso a otra. Acceder a una segunda estación base tiene el inconveniente de que ésta se encuentra a una mayor distancia y la potencia recibida es menor. Asimismo, al utilizar antenas directivas apuntadas hacia la primera estación base en los equipos del abonado, tenemos unas pérdidas de potencia adicionales por no salir por el máximo de la antena. Se ha evaluado el comportamiento del sistema accediendo a dos estaciones base y la calidad total resulta equivalente a la del sistema original. El segundo acceso disminuye la probabilidad de bloqueo, pero las llamadas conectadas a la segunda estación base tienen una peor calidad resultando en un aumento de la probabilidad de interrupción. Los dos efectos se compensan y el GOS final es el mismo.

Una solución a la pérdida de potencia es instalar antenas de abonado que, conociendo la posición de sus dos mejores estaciones base, puedan reapuntarse hacia la una o la otra cuando sea necesario. Esta posibilidad no resulta muy compleja ya que

todos los elementos del sistema son estáticos y es posible conocer los coeficientes de desfase de las antenas de antemano. Al disponer de la posibilidad de reapuntamiento en los terminales, la capacidad del sistema, con antenas de 120° y 3 frecuencias, aumenta de los 10 Erlangs por emplazamiento hasta los 12. Si ha este sistema además le añadimos control de potencia basado en la relación C/I , pasamos a estar limitados por capacidad y cursamos 25.5 Erlangs por emplazamiento. Finalmente, instalando un segundo transceptor por estación base, cada emplazamiento puede cursar 45.6 Erlangs, siendo la limitación por interferencias.

Otro método para mejorar la calidad de los canales y de esta forma aumentar la capacidad del sistema se basa en el hecho que para escoger un canal de comunicación, el DECT sólo tiene en cuenta la calidad del canal de bajada. El terminal, en base a su lista de mejores canales de bajada, propone uno para la comunicación, si éste supera el umbral de calidad en el canal de subida se acepta para la conexión, en caso contrario se intenta el siguiente de la lista hasta un número máximo de intentos. El funcionamiento de este método tiene dos consecuencias negativas. La primera es que muchas conexiones tienen la calidad de los dos enlaces muy dispar, el canal de bajada es normalmente muy bueno y el de subida no tanto. Puesto que una comunicación no se cursa si cualquiera de los dos enlaces no llega al mínimo, es mejor tener dos enlaces mediocres que uno excelente y otro pobre. La segunda consecuencia es que al tener un número limitado de intentos, es posible que una llamada no encuentre canal para cursarse, debido a que el que cumple los requisitos para el enlace de subida no se encuentra entre el número máximo de intentos que el terminal realizará. Por todo ello sería interesante ver la evolución del sistema si el terminal dispusiera de información sobre ambos enlaces de la comunicación. Se ha estudiado un sistema en que la estación base construye una lista con sus mejores canales y la envía por los canales de control con el resto de información de sistema. El terminal recibe esta información y para cada canal escoge el enlace que tiene peor calidad, seguidamente construye una nueva lista ordenando los canales con este parámetro. Se han evaluado otras formas de ordenar la lista con la información disponible, sin embargo, el resultado final era un empeoramiento del comportamiento del sistema.

Con este mecanismo se consiguen dos efectos. El primero es que se producen menos interrupciones de llamadas en curso porque el peor canal, que es quien provoca la interrupción, es ahora mejor en media que en un sistema sin información de estación base. El segundo, que la elección del canal para el acceso está más bien dirigido y no se realizan intentos con canales que ya se sabe de antemano que no cumplen los requisitos, disminuyendo también el tiempo de acceso. Cabe destacar que este método no reduce las interferencias sino que optimiza el mecanismo de acceso.

Aplicando información de estación base se han conseguido incrementos del 20 % en sistemas que utilizan 36 canales y del 49 % para aquellos que utilizan 120. Nótese que el proceso de selección de canal es más importante para aquellos sistemas que

disponen de más canales ya que al haber un número limitado de intentos, el porcentaje de los que se pueden intentar es menor en éstos.

El último método estudiado es disponer arrays adaptativos en las estaciones base. Este método consiste en sustituir las estaciones base fijas existentes en los diferentes emplazamientos por otra que disponga de una antena tipo array adaptativo. Esta estación base dispone de uno o varios transceptores independientes que pueden apuntar el diagrama de radiación en la dirección que deseen en cada tiempo de slot. La complejidad tecnológica es baja ya que la estación base dispone de una base de datos con los coeficientes de la antena para cada usuario fijo y apunta al terminal una vez este se ha identificado.

La capacidad máxima del sistema con arrays adaptativos, 3 frecuencias y antenas de 120° en todos los equipos radio se consigue con 4 transceptores y se eleva a 24 Erlangs por emplazamiento. Si sustituimos las antenas de 120° por otras de 60° e instalamos 5 transceptores cada emplazamiento puede llegar a cursar 31 Erlangs.

La ETSI define en su documento [ETR310] los requerimientos de tráfico para un sistema RLL. Para áreas urbanas, con requerimientos de tráfico basados en servicio de voz, describe diferentes entornos de utilización y sus necesidades de tráfico:

- Zonas residenciales y suburbanas con edificios de 2 a 4 pisos: de 35 a 140 Erlangs/Km².
- Zonas urbanas con alta densidad de tráfico, edificios de 4 a 8 pisos: de 140 a 280 Erlangs/Km².
- Centros metropolitanos de oficinas: 1000 Erlangs/Km². Estas áreas no son típicas para un bucle de abonado vía radio, pero sí que están en los objetivos de segundos operadores. Se supone que éstos conseguirán el 10 % del mercado, con lo que el sistema RLL tiene que soportar unos 100 Erlangs/Km².
- Países en vías de desarrollo: 300 Erlangs/Km².

Puede concluirse que las necesidades típicas del sistema RLL están entre 100 y 150 Erlangs/Km². Con previsiones de doblarse en pocos años debido a los servicios de datos, por lo que se requieren de 200 a 300 Erlangs/Km².

En los sistemas evaluados tenemos un amplio rango de capacidades por emplazamiento. Se ha visto que se pueden conseguir hasta 45 Erlangs por célula hexagonal con un sistema de 3 frecuencias, sin aplicar simultáneamente todos los mecanismos de control de interferencias. Si consideramos que se cursan estos 45 Erlangs por célula hexagonal, la separación entre emplazamientos de estaciones base

para conseguir los 300 Erlangs/Km² es de 414 metros, para 200 Erlangs/ Km² la separación resulta de 508 metros. En las simulaciones la separación es de 600 metros.

Con todo ello se considera que los mecanismos estudiados resultan viables tecnológica y económicamente, y permiten utilizar el estándar DECT como aplicación de bucle de abonado vía radio. Además, no es necesario que para aplicar las modificaciones propuestas tenga que revisarse el estándar, sino que pueden ser implementadas en soluciones propietarias de los fabricantes para dar un valor añadido a sus equipos.

6.7 EVALUACION DEL MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACION DE UN SISTEMA DE TERMINAL SIN CORDON CON MOVILIDAD

En 1992, la ETSI en su comité *Strategic Review Committee on Public Networks* (SRC4) recomendó el estudio de viabilidad de la movilidad de terminales en redes fijas públicas y privadas utilizando tecnologías sin cordón (CT2 y DECT). Con la aplicación de terminal sin cordón con movilidad se proyectaba dar servicio de movilidad en este tipo de redes aunque no se pretendía proveer del grado de movilidad de las redes de comunicaciones celulares. Un sistema CTM es visto más bien como un servicio básico, complementario a la red fija, más que un competidor para dichas redes celulares. Además, el servicio CTM ofrece la posibilidad de proporcionar un servicio de telecomunicaciones móviles, dirigido a un gran mercado. En Japón ya existen operadores ofreciendo este tipo de servicio con el sistema PHS.

Para simular esta aplicación se ha elegido un escenario con edificios y calles donde aparecen terminales que pueden ser estáticos o móviles que se desplazan a lo largo de las calles. Para simplificar la simulación se ha tomado una distribución de los edificios tipo Manhattan [CAS6].

6.7.1 PARÁMETROS CRÍTICOS

Los parámetros críticos a la hora de modelar la aplicación de CTM son los mismos y se comportan básicamente de la misma forma que en la aplicación RLL, aunque su valor difiere.

6.7.1.1 Pérdidas de propagación

Para modelar las pérdidas de propagación en un entorno con calles existen básicamente dos grupos de modelos comentados en el capítulo 5: los de una pendiente y

los de dos pendientes. Adicionalmente se pueden añadir unas pérdidas fijas cuando la señal tiene que doblar una esquina.

Los modelos de propagación de dos pendientes presentan un grave problema en situaciones de NLOS. Hasta el momento se ha considerado que los enlaces de subida y bajada eran simétricos en cuanto a potencia recibida, hecho bastante usual en la realidad. Si el modelo considera un factor de pérdidas para el tramo que va desde el transceptor hasta la esquina donde se pierde la visión directa, y otro factor para la distancia de dicha esquina hasta el receptor. Cuando estas dos distancias son muy dispares el modelo considera que se obtiene mucha más potencia en un enlace que en otro. Para escoger un canal, el DECT se basa en que los dos enlaces tienen una calidad del mismo orden de magnitud, si ésta difiere excesivamente el sistema de asignación dinámica de canal utilizado por el DECT resulta del todo ineficiente.

Para evitar este problema se ha escogido el siguiente modelo de pérdidas de propagación de una pendiente:

$$L_{\text{LOS}}(d) = 55 + 20 \log(d) \text{ [dB]} \quad (\text{visión directa})$$

$$L_{\text{NLOS}}(d) = 55 + 20 \log(d_1) + 25 + 20 \log(d_2) \text{ [dB]} \quad (\text{visión no directa})$$

donde:

d = distancia entre transmisor y receptor

d_1 = distancia entre transmisor y esquina que corta la visión directa

d_2 = distancia entre esquina y receptor

En [CAS7] pueden encontrarse algunos resultados con un modelo de pérdidas de propagación de dos pendientes.

6.7.1.2 Atenuación por sombras

Las consideraciones sobre la atenuación por sombras son las mismas que en el caso de un sistema RLL. Para el factor de sombras se toma una variable aleatoria con distribución lognormal, de media cero y desviación típica 8 dB.

Al aparecer un terminal móvil se le asignará un factor de sombras diferente para cada emplazamiento de estaciones base del área de simulación.

6.7.1.3 Desvanecimiento multicamino

Al igual que en la aplicación RLL el desvanecimiento multicamino se ha considerado añadiendo un margen de protección a la relación C/I mínima. Para poder trabajar correctamente, el decodificador ADPCM requiere una C/I mínima de 10 dB. Un margen común en aplicaciones móviles es de 20 dB, pero en nuestro caso que

disponemos de diversidad de antena, podemos rebajarlo a 11 dB. La relación C/I mínima requerida para establecer y mantener una conversación queda establecida en 21 dB.

6.7.1.4 Efecto de la sensibilidad, ganancia de antenas y separación de estaciones base

Los escenarios urbanos que modelan sistemas con calles donde la señal sufre súbitas atenuaciones debidas a que el usuario dobla alguna esquina son especialmente sensibles a las ganancias de antena y sensibilidades de los receptores. El propósito de este trabajo es estudiar el efecto que producen las interferencias en la capacidad del sistema y evaluar su eficiencia, y no estudiar si los equipos reciben suficiente señal. Si el sistema no funciona correctamente por falta de potencia, sencillamente se disminuye el tamaño de las células o se aumenta la potencia radiada. Si la limitación del sistema es la interferencia, ninguna de las soluciones anteriores es valida. Por ello se han considerado unos parámetros de potencia para que el sistema no se vea perjudicado por llamadas que no puedan cursarse por falta de potencia recibida.

Se han considerado equipos de sensibilidades de -83 dBm, una potencia de transmisión de 250 mW y ganancias de antena de estación base de 25 dB. Se supone que el terminal móvil utiliza antenas omnidireccionales que no pueden disponer de ganancia alguna. Las distancias del sistema son: longitud de los edificios de 100 metros y ancho de calles de 10 metros. Los terminales móviles siempre aparecen y se mueven por el centro de la calle. Con todo ello, si suponemos una comunicación bastante desfavorable, donde la estación base se encuentra en medio de una manzana y el terminal en la misma posición de la calle perpendicular, es decir no tienen visión directa, nos queda un margen de protección para el factor de sombras de:

$$\text{Margen de protección.} = \text{Potencia emitida} + \text{Ganancia de antenas} - \text{Pérdidas de propagación} - \text{Sensibilidad}$$

Para los parámetros utilizados:

$$\text{Margen de protección} = 24 \text{ dBm} + 25 \text{ dB} - (55 + 20 \log (55) + 25 + 20 \log (55)) + 83 \text{ dBm}$$

$$\text{Margen de protección} = 37 \text{ dB}$$

Este margen es suficiente para no perder la llamada ya que como máximo se consideran pérdidas debidas a sombras de 30 dB.

6.7.1.5 Movilidad de los usuarios

En las simulaciones presentadas, cuando aparece un usuario se le asigna aleatoriamente y con igual probabilidad una de las velocidades posibles. Posteriormente, si el terminal es móvil escoge, también con igual probabilidad, una dirección y empieza a moverse por el centro de la calle. Al llegar a una esquina continua recto el 60 % de las veces y gira hacia la derecha o la izquierda con una probabilidad del 20 % para los dos casos. Estas probabilidades se han tomado como valores pesimistas ya que normalmente el porcentaje de giros en las esquinas es menor. Como se verá en los puntos posteriores el hecho de girar una esquina provoca en la mayoría de ocasiones un traspaso con la consiguiente probabilidad de interrupción. De esta forma obtenemos unos resultados del grado de servicio conservadores. Cuando el móvil llega a la frontera del área de simulación cambia de sentido.

6.8 CAPACIDAD DEL ESTÁNDAR DECT UTILIZADO COMO SISTEMA DE TERMINAL SIN CORDÓN CON MOVILIDAD

En este apartado se evalúa la capacidad de un sistema CTM en un entorno urbano con calles tipo Manhattan. Las estaciones base pueden estar montadas sobre farolas o semáforos y pueden utilizar antenas omnidireccionales o directivas. Los terminales al ser móviles sólo disponen de antenas omnidireccionales. El principal objetivo de este punto es ver la capacidad que ofrece el DECT dando este tipo de servicio y así poder evaluar su viabilidad. Un factor que es susceptible de influir en el comportamiento del sistema es la posición de las estaciones base respecto a las calles; también es objetivo de este apartado el proporcionar información de cuales son las posiciones que ofrecen mayores capacidades al sistema.

Se han simulado varios casos de distribuciones regulares de estaciones base: en el centro de las calles o en las esquinas. En la figura 6.8.1 podemos ver las tres situaciones estudiadas. El primer caso sitúa una estación base en cada esquina ("ESQUINA"), para ello se requiere una estación base por manzana y resulta en una situación en la cual todas las estaciones base están equidistantes. El segundo caso conserva el mismo número de estaciones base pero las sitúa en el centro de las calles ("1 CALLE"). Para tener buena calidad de señal es necesario que todas las calles estén cubiertas por al menos una estación base en visión directa, por lo cual debemos colocar las estaciones base en calles alternadas. Esta situación tiene la desventaja de que existen puntos en los que el móvil puede encontrarse más alejado de su estación base que en el caso anterior. Para solucionar este inconveniente podemos situar una estación base en cada calle, con lo cual tenemos una distribución regular, como el primer caso, pero con dos estaciones base por manzana ("2 CALLES").

En todas las simulaciones de CTM se ha considerado que el sistema dispone de todo el espectro, es decir, tenemos 10 frecuencias o 120 canales.

Cabe destacar que todos los trasposos que se realizan en un sistema de RLL son intracélula, se cambia de canal pero no de estación base. Este comportamiento se debe a que para un terminal que no se mueve, la mejor estación base es siempre la misma, por lo que al realizar un trasposo no cambia de estación, exceptuando el caso particular de que un terminal pueda acceder a dos estaciones base. Para sistemas con usuarios móviles pueden darse tanto trasposos intracélula como intercélula, trasposos en los que se cambia de estación base porque el móvil se aleja de la que estaba conectado hasta el momento. Los trasposos intercélula en el sistema DECT se realizan de forma rápida ya que el terminal realiza cada cierto tiempo una actualización de su tabla de mejores canales. De esta forma cuando se inicia un trasposo ya puede escoger el primero de la lista de forma casi inmediata. Si se da el caso de que en el momento de realizar el trasposo las condiciones interferentes han cambiado de forma inesperada, al entrar en una esquina, se supone que el tiempo que tarda en actualizar la tabla de mejores canales, se encuentra dentro de los 5 segundos de baja calidad permitidos antes de interrumpir la llamada.

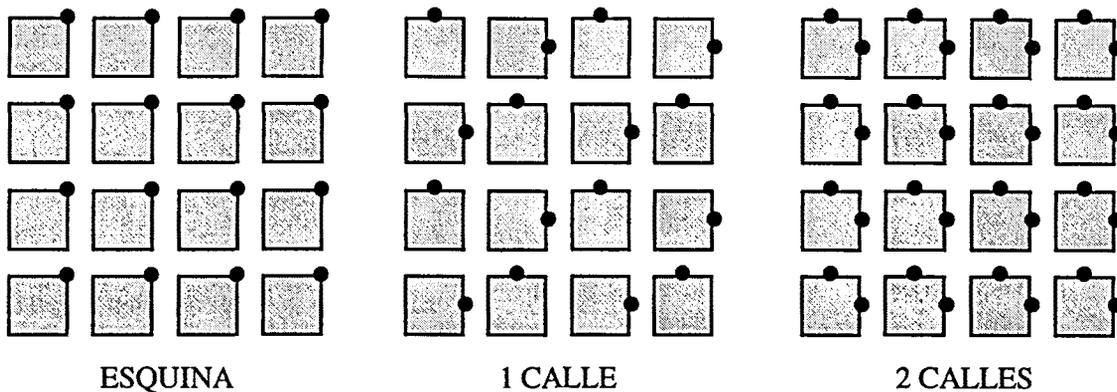


Figura 6.8.1 Distribución de las estaciones base sobre el área de simulación.

En primer lugar se analiza un sistema básico de CTM que considera un sólo transceptor por RFP y antenas de estación base omnidireccionales. En la figura 6.8.2 podemos ver el grado de servicio obtenido con las diferentes ubicaciones de estaciones base. Debe tenerse en cuenta que el caso "2 CALLES" soporta globalmente el doble de tráfico que los otros dos sistemas, ya que tiene el doble de estaciones base.

En la citada figura se diferencian claramente dos grupos de gráficas, las de usuarios móviles a 1 m/s y las de usuarios parados o a 0 m/s. Los usuarios estáticos tienen un mejor comportamiento que los móviles debido a que estos últimos, al desplazarse, requieren de un número mayor de trasposos, y siempre existe una cierta probabilidad de que no pueda llevarse a cabo.

Dentro de cada grupo el comportamiento relativo a la posición de estaciones base es diferente. Los usuarios estáticos están limitados casi por completo debido a la falta de canales en las estaciones base ya que su GOS se acerca al límite de los 5.8 Erlangs por RFP. La capacidad del sistema para este tipo de usuarios es prácticamente la misma sea cual sea la posición de las estaciones base, aunque existe una pequeña tendencia de mejora para la distribución en las calles sobre la de las esquinas. Este efecto es debido a que las estaciones base situadas en las calles, sólo interfieren y son interferidas directamente por los terminales situados en la misma calle, mientras que cuando se sitúan en las esquinas las interferencias directas vienen por las dos calles que confluyen en la esquina, aumentando en número.

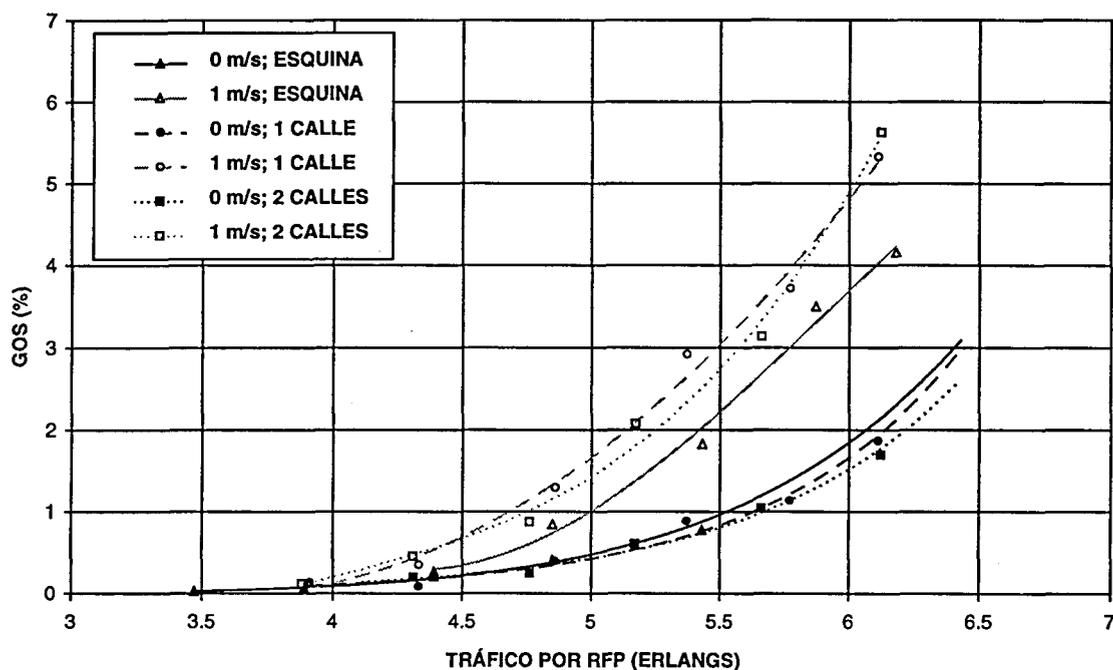


Figura 6.8.2 Capacidad de un sistema CTM con las estaciones base situadas en diferentes emplazamientos, con 1 transceptor por RFP.

Para usuarios con movilidad el efecto es el contrario, obtienen mayor capacidad con las estaciones base situadas en las esquinas. Como ya se ha comentado anteriormente, el principal problema de los usuarios móviles es que al aumentar el número de trasposos aumenta su probabilidad de interrupción. Si disponemos las estaciones base en las calles, un móvil, al girar una esquina, y según el modelo de propagación considerado, tiene una pérdida súbita de señal de 25 dB. Estas pérdidas tienen dos consecuencias, la primera que los receptores pueden recibir una potencia por debajo de la sensibilidad, resultado poco probable ya que disponemos de suficiente margen de protección por la alta ganancia de las antenas. La segunda, que la relación C/I también baja repentinamente 25 dB, esta pérdida de calidad sí que desencadena, en la mayoría de las ocasiones, un traspaso. Con las estaciones base en las esquinas, la peor

posición para un terminal es en la mitad de la calle, donde la señal decrece progresivamente y no tiene porque iniciarse necesariamente un traspaso. Cuando el terminal gira una esquina, si ésta es la de su propia estación base, no se pierde la visibilidad y no se produce caída de señal. Para el caso de que se trate de otra esquina, aunque se pierdan 25 dB con la primera estación base, el traspaso tiene una alta probabilidad de realizarse ya que tiene otra estación base a muy corta distancia, solamente puede interrumpirse la llamada si esta otra RFP no dispone de ningún canal para cursar la llamada.

Otro efecto perjudicial que soportan los terminales al entrar en las esquinas, sin importar el tipo de distribución de estaciones base, es el incremento de señales interferentes que reciben. Antes de introducirse en el cruce de calles reciben las interferencias en visión directa de la calle por la cual se desplazan, al entrar en él, reciben además las de la calle perpendicular. En estas situaciones es mejor tener las estaciones base cerca de los terminales por lo que la distribución en las esquinas también se comporta mejor que en las calles.

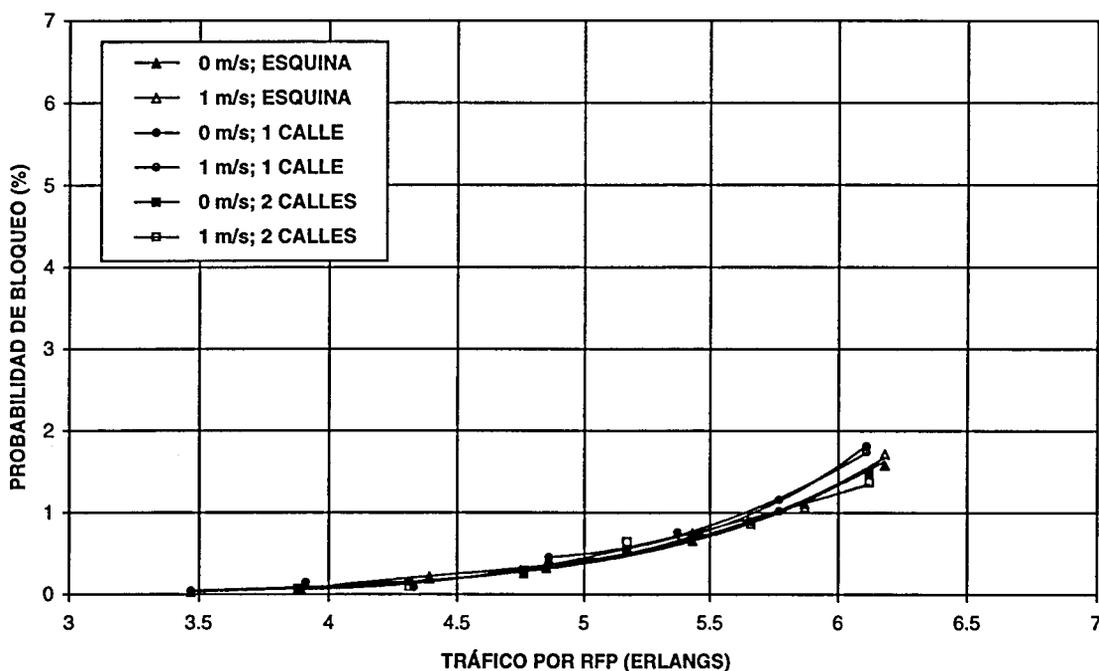


Figura 6.8.3 Probabilidad de bloqueo de un sistema CTM con las estaciones base situadas en diferentes emplazamientos, con 1 transceptor por RFP.

En la distribución de calles tenemos dos casos: “1 CALLE” con una estación base por manzana en calles alternadas, y “2 CALLES” con dos estaciones base por manzana y en cada calle. En la figura 6.8.2 vemos que ambos casos cursan, para un GOS del 1 %, un tráfico de 4.75 Erlangs por RFP, pero con una mínima mejora para el caso de “2 CALLES”. Este comportamiento se debe a que si disponemos las estaciones base en calles alternadas la distancia entre estación base y terminal es, en media,

superior a la de la otra distribución, lo cual provoca un empeoramiento de la relación CTI y un aumento de los traspasos. En la distribución alternada también existen dos tipos de giros en las esquinas, los que se producen en la esquina de la misma manzana y los que se producen en los de la manzana siguiente. Los primeros son obviamente menos nocivos por la proximidad del cruce. En la distribución "2 CALLES", todos los giros son de este tipo.

Como conclusión podemos decir que este sistema está básicamente limitado por falta de canales, véase en la figura 6.8.3 como para una probabilidad de bloqueo del 1 %, todos los casos cursan un tráfico cercano a 5.8 Erlangs por RFP; lo cual indica que las interferencias no provocan ningún bloqueo. La probabilidad de bloqueo es igual para todos los tipos de usuarios ya que el establecimiento es independiente del movimiento y sólo depende del estado del sistema en el instante de aparición de la llamada.

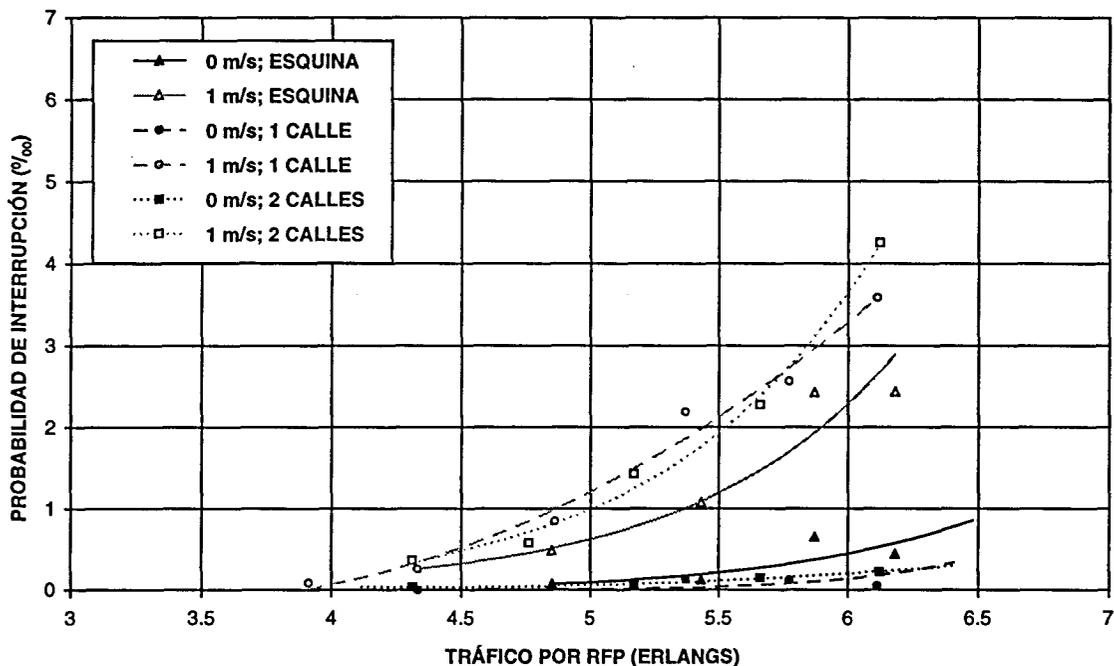


Figura 6.8.4 Probabilidad de interrupción de un sistema CTM con las estaciones base situadas en diferentes emplazamientos, con 1 transceptor por RFP.

Las probabilidades de interrupción de la figura 6.8.4 son debidas básicamente al movimiento de los terminales. Mientras que para usuarios estáticos son prácticamente nulas, en los móviles son la componente principal del GOS, siendo su comportamiento el mismo que el comentado sobre este parámetro.

En la figura 6.8.5 se observan el número de traspasos intercélula que se realizan en las diferentes distribuciones de estaciones base para cada 100 llamadas. Podemos destacar tres puntos:

- En el caso de "2 CALLES" el tráfico global del sistema es el doble que en los casos "1 CALLE" y "ESQUINA" lo que provoca un aumento muy considerable de traspasos debido a que el sistema debe soportar más interferencia.
- Sin considerar el caso "2 CALLES", los usuarios estáticos realizan menos traspasos intracélula cuando las estaciones base están situadas en las calles, que cuando lo están en las esquinas. Esto se debe a que el situar las estaciones base en las calles protege mejor de las interferencias ya que existe visión directa con otros terminales co-canal en menos ocasiones.
- La movilidad del usuario produce principalmente traspasos intercélula, como se puede observar en la figura 6.8.6. Pero el hecho de que un usuario se mueva repercute también en los traspasos intracélula. Un traspaso intracélula se desencadena cuando la relación C/I se ve perjudicada por la aparición repentina de alguna interferencia. Un caso sería la aparición de una llamada co-canal que afecta tanto a usuarios estáticos como móviles. Otra situación que puede desencadenar un traspaso intracélula se produce sólo en los terminales móviles que pueden pasar, al entrar en un cruce, de verse interferidos por las interferencias en visión directa de una calle a las de dos.

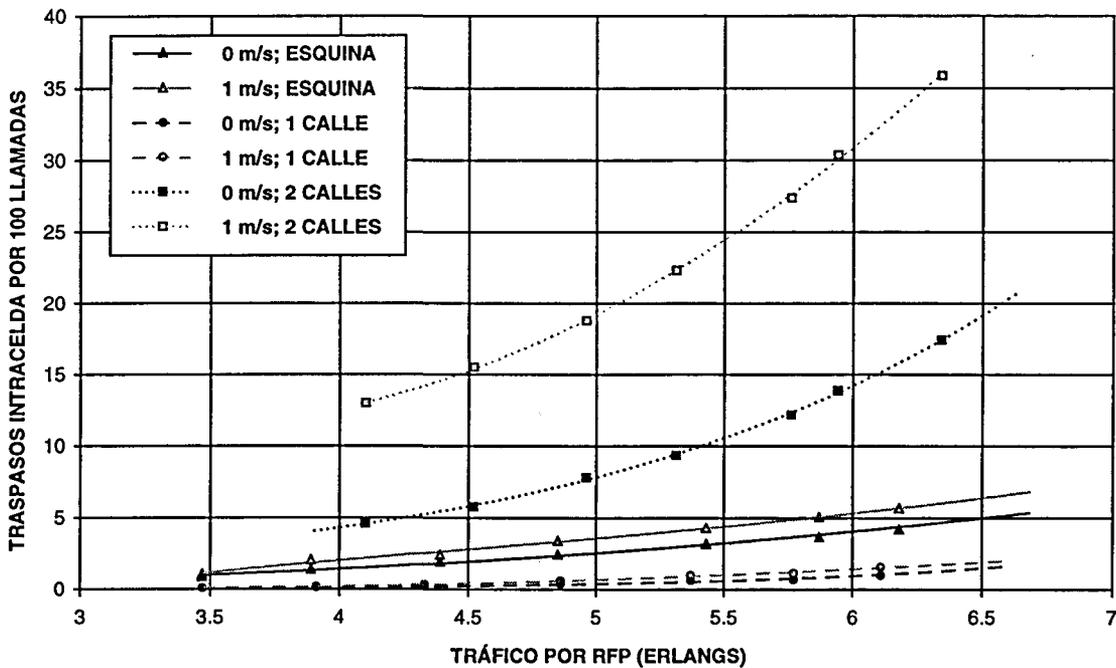


Figura 6.8.5 Traspasos intracélula para las diferentes situaciones de emplazamientos con 1 transceptor por RFP.

En relación al número de traspasos intercélula (figura 6.8.6), éste es superior cuando las estaciones base están en las calles que cuando están en las esquinas, excepto

en el caso "2 CALLES" que cursa el doble de tráfico. Este efecto se debe a que en el caso "1 CALLE" los móviles pierden visibilidad directa al girar en una esquina y deben realizar un traspaso y en el caso "ESQUINA" muchas veces no es necesario.

En todos los escenarios los dos parámetros que regulan el número de traspasos intercélula son la velocidad de los móviles y el tráfico del sistema. Como es obvio, un incremento de la velocidad de los terminales repercute en un aumento del número de traspasos intercélula, ya que la distancia que pueden recorrer durante el tiempo que dura una llamada es mayor. De todas formas, los traspasos no se desencadenan hasta que los receptores no reciben suficiente potencia o calidad. En sistemas poco interferidos la calidad será alta y el traspaso lo provoca la falta de potencia y en sistemas muy interferidos, el traspaso se desencadena por falta de calidad. De esta forma los sistemas "1 CALLE" y "ESQUINA" al ser sistemas poco interferidos permiten que un terminal móvil que no gire esquinas se aleje mucho más allá de la frontera de la célula de la estación base a la que está conectado ya que dispone de suficiente potencia, produciéndose pocos traspasos.

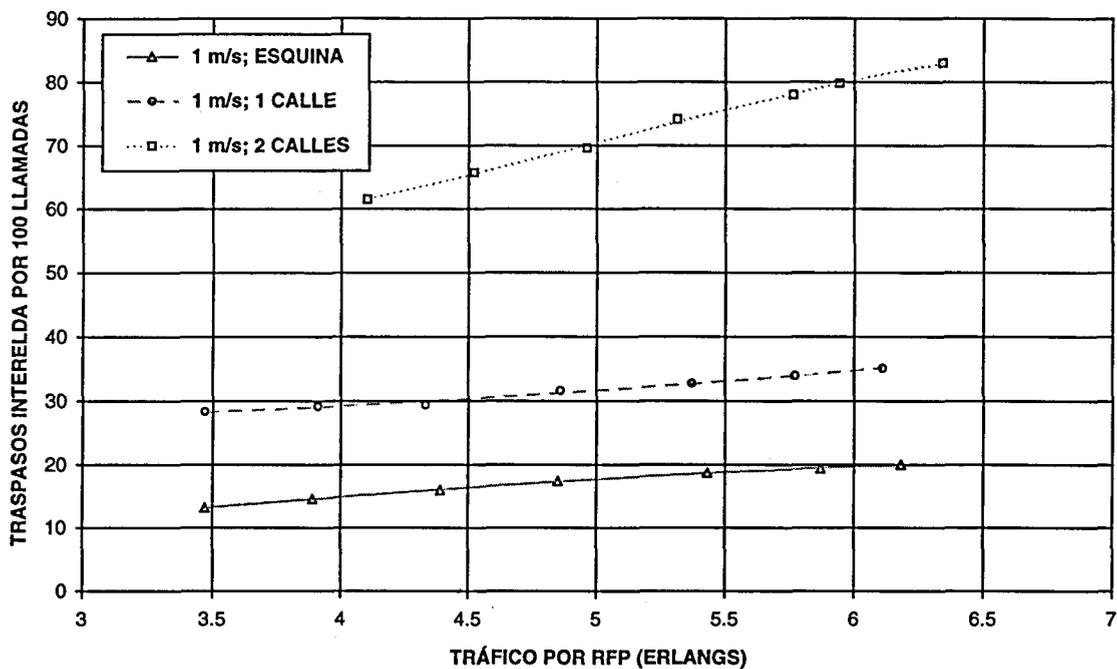


Figura 6.8.6 Traspasos intercélula para los escenarios con 1 transceptor por RFP.

Analizando el caso de tener las estaciones base en las esquinas, en media, un terminal móvil a velocidad de 1 m/s y durante el tiempo de llamada de 100 s recorre 100 m. Con lo que todos los terminales móviles cruzan una vez la frontera entre dos células. Si los traspasos se produjeran en la frontera tendríamos que cada llamada genera un traspaso. Esta situación no se da ya que muchos móviles pueden continuar más allá de su célula. En el caso doblemente interferido de "2 CALLES" cada comunicación necesitará el máximo de potencia recibida para no caer por debajo del umbral de

relación C/I. Para ello un terminal móvil que salga de su célula y encuentre una estación base mejor normalmente realizará un traspaso.

6.8.1 UTILIZACIÓN DE DOS TRANSCPTORES

Como se ha visto en el apartado anterior los tres sistemas estaban limitados básicamente por falta de capacidad en las estaciones base más que por interferencias. Para solucionar este problema y aumentar las prestaciones del sistema se han dispuesto dos transceptores por RFP. En la figura 6.8.7 se representa el GOS respecto a la capacidad por RFP para este sistema. El tráfico máximo que puede soportar cada RFP para una probabilidad de bloqueo del 1 % es de 15.2 Erlangs. Observando la citada figura vemos que ninguna curva se acerca a este límite por lo que el sistema ya se encuentra limitado por interferencias.

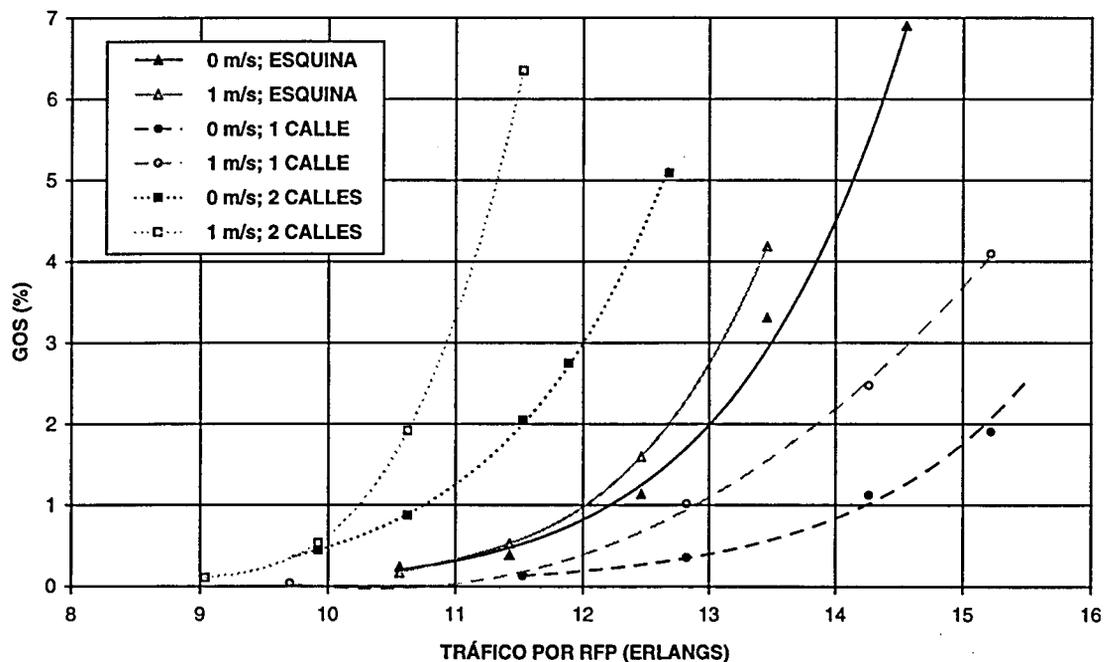


Figura 6.8.7 Capacidad de un sistema CTM con las estaciones base situadas en diferentes emplazamientos, con 2 transceptores por RFP.

Dejando aparte el escenario “2 CALLES” que tiene el doble de estaciones base. De los dos sistemas con igual infraestructura, el de distribución en calles es claramente superior. Para usuarios estáticos se consiguen 14.25 Erlangs por RFP frente a 12.25 y para móviles 12.8 Erlangs frente a 12. Con ello que se constata que la ganancia que se consigue resguardando las estaciones base en las calles es mayor que la que se consigue no teniendo que realizar traspasos en las esquinas.

En la figura 6.8.8 se representa la probabilidad de bloqueo de los tres sistemas. Como era de esperar la velocidad no influye en estos resultados aunque sí que influye la posición de las estaciones base. El comportamiento del sistema es comparable al del GOS: mientras que los usuarios del sistema “1 CALLE” están limitados por capacidad y por interferencia los otros dos lo están totalmente por interferencia.

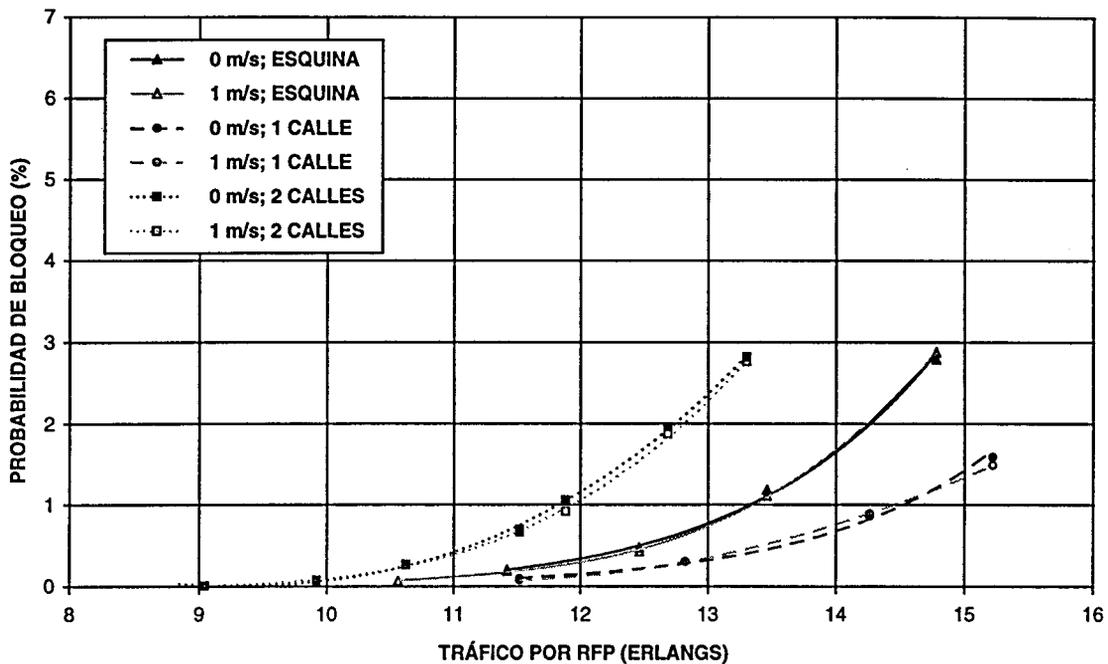


Figura 6.8.8 Probabilidad de bloqueo de un sistema CTM con las estaciones base situadas en diferentes emplazamientos, con 2 transceptores por RFP.

En la probabilidad de interrupción de la figura 6.8.9 los sistemas “1 CALLE” y “2 CALLES” tienen un proceder similar aunque el segundo esté mucho más interferido. En ambos casos existe una disparidad bastante acentuada entre los usuarios estáticos y los móviles. Mientras que los primeros tienen una probabilidad de interrupción baja debido a la atenuación de las interferencias que ejercen las calles, en los segundos se aprecia el efecto negativo que ejercen los giros en las esquinas. Por el contrario, los usuarios del sistema “ESQUINA” son más independientes de su velocidad ya que desaparece el citado efecto esquina. Esta dependencia de la velocidad está relacionada con el tipo mayoritario de traspasos que cada sistema realiza. Con las estaciones base en las calles dominan las pérdidas por traspasos intercélula, que son los causados sólo por los terminales móviles y por consiguiente éstos tienen peor probabilidad de interrupción. Con las estaciones base en las esquinas dominan las pérdidas causadas por los traspasos intracélula que son causados en aproximadamente igual medida por ambos tipos de usuarios, por lo que su probabilidad de interrupción es similar.

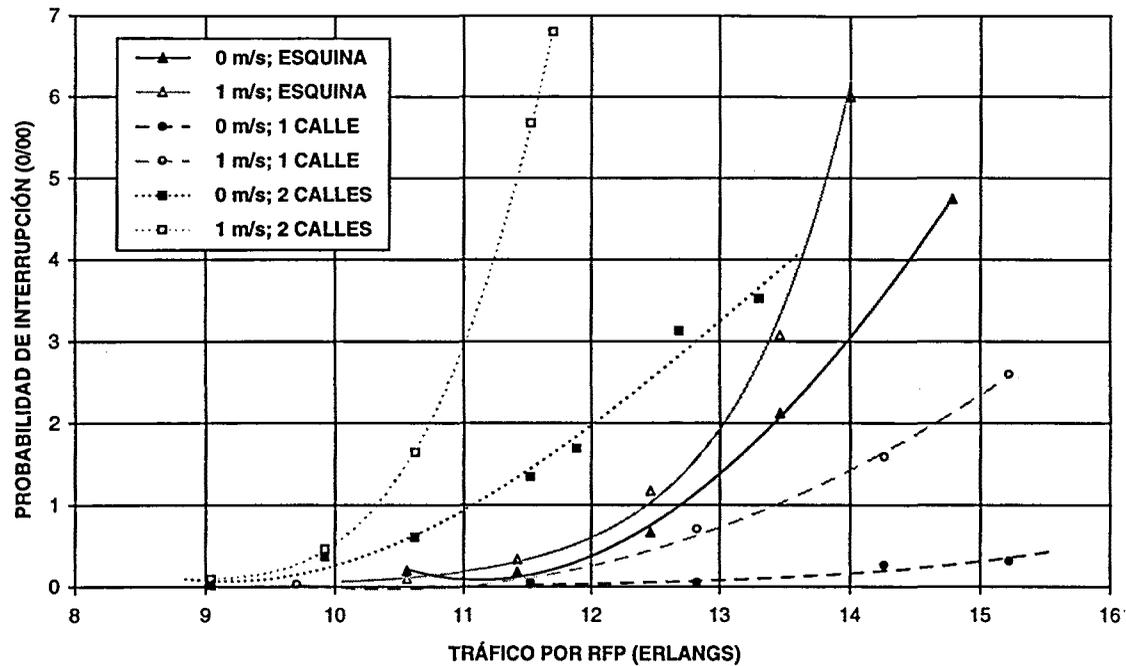


Figura 6.8.9 Probabilidad de interrupción de un sistema CTM con las estaciones base situadas en diferentes emplazamientos, con 2 transceptores por RFP.

Para comparar el sistema de "2 CALLES" con el de "1 CALLE" pero con la misma densidad de transceptores, consideramos el primer sistema con un transceptor por RFP (figura 6.8.2) y el segundo con dos. Obtenemos de esta forma un tráfico de 11.3 Erlangs por manzana para los usuarios estáticos del sistema "2 CALLES" frente a los 14.25 del "1 CALLE"; para usuarios móviles el primero obtiene 9.5 Erlangs por manzana y el segundo 12.8. En consecuencia es mejor disponer de una sola estación base por manzana y aplicarle dos transceptores que disponer dos estaciones base por manzana. Parte de la mejora es debida al hecho de que al utilizar dos transceptores en la misma RFP se pueden compartir recursos, mientras que si están en diferentes emplazamientos no es posible. Esta mejora es todavía más importante si se tiene en cuenta que es necesario menos infraestructura en el caso de situar dos transceptores juntos que separados.

6.8.2 UTILIZACIÓN DE ANTENAS DIRECTIVAS

El apartado anterior nos lleva a la conclusión de que el sistema que proporciona mejores resultados es disponer dos transceptores por RFP y una RFP por manzana, situadas en calles alternadas. El citado sistema se encuentra limitado por interferencias. Con la ubicación de las estaciones base en las calles resulta sencillo instalar antenas directivas de 180°, orientadas en la dirección de la calle pero en sentidos inversos. De

esta forma tenemos dos estaciones base situadas en el emplazamiento donde el sistema anterior tenía una.

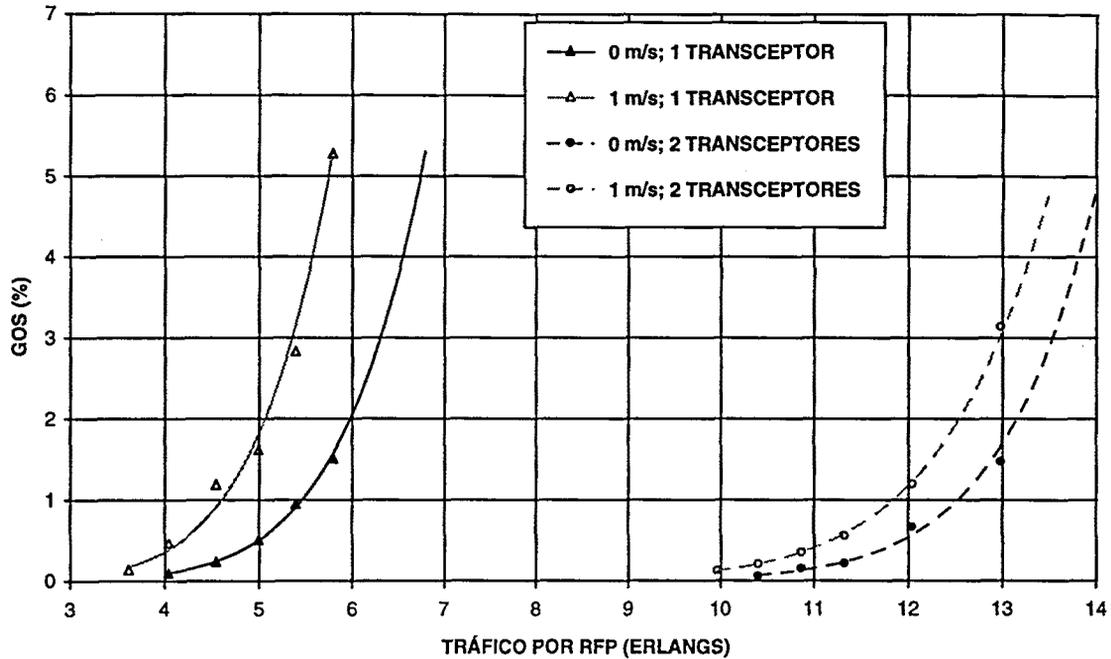


Figura 6.8.10 Capacidad de un sistema CTM con estaciones base directivas de 180°. Emplazamientos de estaciones base situados en calles alternadas con uno por manzana.

En la figura 6.8.10 se observa básicamente la capacidad del sistema con antenas directivas. Para un transceptor el sistema resulta limitado por capacidad al igual que los sistemas con antenas omnidireccionales, a pesar de que el tráfico por manzana es el doble. La capacidad del sistema puede aumentarse añadiendo otro transceptor. En estas circunstancias el sistema admite un tráfico de 12.5 Erlangs por RFP para usuarios estáticos y 11.8 para los móviles. El equivalente en cuanto a densidad de estaciones base y antenas omnidireccionales es el caso "2 CALLES" con dos transceptores por RFP que cursa 10.75 Erlangs por RFP para los estáticos y 10.25 para los móviles. En esta situación también debe tenerse en cuenta que al disponer antenas directivas, las dos estaciones base están en el mismo emplazamiento físico mientras que en el caso de omnidireccionales no, circunstancia que encarece la infraestructura. Con ello resulta más efectivo instalar dos estaciones base directivas en el mismo emplazamiento que dos de omnidireccionales en emplazamientos diferentes.